



Universidade do Porto

**FEUP** Faculdade de Engenharia

Procedimentos de Aplicação e Controlo de Qualidade  
para  
Reforço com Sistemas Compósitos de FRP

**Nuno Filipe Amaro Afonso Marques**

Licenciado em Engenharia Civil

pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Dissertação apresentada à

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil**

realizada sob orientação do Professor Doutor **Luís Filipe Pereira Juvandes**

do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Novembro de 2008



*Aos meus queridos Pais e Irmãos*





## Índice Geral

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS.....	vii
ÍNDICE DE TEXTO .....	ix
GLOSSÁRIO .....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP E TÉCNICA DE COLAGEM EXTERIOR .....	5
CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	23
CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO .....	45
CAPÍTULO 5 – CONTROLO DE QUALIDADE.....	89
CAPÍTULO 6 – PASSAGEM INFERIOR 10 DA IC24 .....	113
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	133
REFERÊNCIAS .....	137



## Agradecimentos

A todos os que me acompanharam durante esta fase da minha vida através da sua disponibilidade, compreensão e amizade e que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, desejo expressar aqui o meu profundo reconhecimento e agradecimento.

Ao Professor Luís Juvandes, orientador científico da dissertação, entusiasta deste trabalho desde o seu início, quero expressar o meu profundo agradecimento pelos seus ensinamentos, inigualável dedicação e, principalmente, amizade. Manifesto-lhe ainda a minha gratidão pelo exemplo marcante que o seu rigor científico constituiu para a minha formação como engenheiro.

À empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A., na pessoa do Engenheiro Matos de Almeida, quero expor o meu agradecimento pelo apoio financeiro e pela oportunidade de acompanhar a obra de alargamento do IC24 que possibilitaram a realização deste trabalho (ao abrigo do protocolo MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A./ LEMC - Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção, FEUP, documento nº 3700015388).

À generalidade das empresas fornecedoras de sistemas compósitos de FRP disponíveis em Portugal, nomeadamente, a Clever Reinforcement Ibéria, Lda (Eng Filipe Dourado), a Sika Portugal, S.A (Eng Farinha Santos), a Lusomapei, S.A. (Eng Nelson Moreira), a BASF Construction Chemicals Portugal (Arqtº Filipa Espadinha), a Bettor-MBT Portugal (Engs Filipe Dourado e Henrique Reto), quero manifestar o meu apreço pelo apoio e esclarecimentos relativos aos seus documentos técnicos em estudo neste trabalho.

Ao Eng Thomaz Ripper (LEB - Projectistas, Designers e Consultores em Reabilitação de Construções, L.da) quero expor o meu reconhecimento por colocar à minha disposição o seu tempo e a sua experiência profissional no âmbito de obras de reforço com sistemas compósitos de FRP projectadas em Portugal.

À unidade científica LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural) por me disponibilizar o seu legado científico como membro não doutorado.

Aos colegas e amigos Elói Figueiredo, Professor Arlindo Begonha e Paulo Costeira que através do seu companheirismo, amizade e boa disposição tornaram esta tarefa menos árdua.

Aos meus pais e às minhas irmãs, agradeço de uma forma muito especial, o amor e o carinho que incondicionalmente me dedicam, a compreensão que sempre demonstraram e o permanente incentivo nos momentos mais difíceis.

Finalmente, agradeço à minha Luísa o incentivo, a compreensão, a dedicação e o amor, que tanto têm contribuído para a minha felicidade, e consequentemente para a concretização desta dissertação.



## Resumo

A crescente aplicação da técnica de reforço por colagem exterior de Sistemas Compósitos de FRP (*"Fiber Reinforced Polymer"*) tem vindo a confirmar o facto de ser uma alternativa para o reforço de estruturas com um enorme potencial, fundamentado pelas suas inegáveis vantagens em termos de durabilidade, facilidade e simplicidade de aplicação e de excelente desempenho mecânico. Esta técnica revela-se muitas vezes como a mais apropriada para responder às exigências impostas por ambientes de grande agressividade, assim como, para resolver delicados requisitos estruturais, não só pelas já mencionadas, vantagens mecânicas, como por os seus custos serem comparativamente mais reduzidos que as intervenções de reforço estrutural tradicionais.

O êxito do reforço recorrendo aos sistemas compósitos de FRP depende, em larga escala, da sua correcta execução. Neste domínio, e apesar do esforço desenvolvido por numerosos investigadores, esta é uma técnica relativamente recente, o que implica que ainda não exista em Portugal documentação específica e devidamente normalizada em relação aos procedimentos de aplicação. Este facto, a par da crescente oferta de sistemas compósitos de FRP disponibilizados pelos fabricantes, tem incrementado a dificuldade em obter consenso e sistematização dos procedimentos de execução de um reforço recorrendo a estes sistemas.

Com base no actual cenário, a presente dissertação tem como objectivo fornecer uma base de informação relativa ao processo de construção de um reforço, que engloba a caracterização dos materiais intervenientes e os procedimentos para execução do reforço e para controlo de qualidade. Assim, para além de apoiar o projectista na elaboração das especificações técnicas a incluir no caderno de encargos, estes procedimentos têm como objectivo auxiliar os intervenientes na execução do reforço, nomeadamente o empreiteiro e a fiscalização.

No sentido de permitir um uso mais inteligível e em todo o seu potencial dos sistemas compósitos de FRP, este trabalho procura ( i ) caracterizar detalhadamente os materiais constituintes do sistema compósito de FRP, ( ii ) descrever os procedimentos para a construção de um reforço pela técnica de colagem exterior, ( iii ) elaborar um controlo de qualidade do reforço com sistemas compósitos de FRP.

Finalmente, a elaboração dos procedimentos propostos para a construção do reforço e para o seu controlo de qualidade foram calibrados através do caso prático do reforço da passagem inferior 10 do IC24.



## Abstract

The retrofitting technique application using Fiber Reinforced Polymer (FRP) has proved to be an alternative to retrofit important structures. This technique has several advantages in terms of durability, simplicity of application as well as good mechanical performance. In several applications, this technique as proved to be a good solution to support aggressive ambient conditions. Even though the FRP costs are significantly greater than traditional concrete and steel materials, the costs savings associated with reduced weight, high speed of construction, and lower maintenance might offset the initial higher cost to make the FRP applications competitive when compared to traditional materials.

However, the performance of the FRP retrofit is highly dependent on the quality of the bond between the FRP and the surface of the structural member being retrofitted. Although research has been made to increase the knowledge of this technique, it is still in its initial phase. As a consequence, in Portugal there is no construction specifications or guideline manuals to ensure its right application. This fact, together with increasing number of FRP solutions in the market, has made more difficult to reach a broad agreement on the application specifications.

Based on the current state-of-art, this dissertation aims to gather useful guidelines in construction specifications to help in the design and the *in situ* application. Furthermore, these construction specifications intend to establish tasks among the different entities present in the FRP retrofit. Thus, this dissertation aims to improve and optimize the application of FRP retrofit.

In order to reach the aim of this dissertation, this study is divided as follows: (i) full characterization of the FRP's materials; (ii) description of the steps of the external bonded reinforcement; and (iii) establishment of the quality control of the FRP.

Finally, the proposed guidelines to retrofit structures and quality control using FRP were calibrated based on the case study of the underpass number 10 integrated in the IC24.





## Palavras Chave

Reforço estrutural

Técnica de colagem exterior

Compósito de FRP

Especificações de construção

Controlo de qualidade

Normas EN 1504

## Keywords

Structural strengthening

Externally bonded reinforcement

FRP composite

Construction specifications

Quality control

Standard EN 1504



# Índice de Texto

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Organização .....	3
 <b>CAPÍTULO 2 – SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP E TÉCNICA DE COLAGEM EXTERIOR.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistemas Compósito de FRP .....	5
2.1.1 Fibra .....	6
2.1.2 Adesivo/Resina .....	8
2.1.3 Compósito de FRP .....	11
2.2 Técnica de Colagem Exterior ( <i>Externally Bonded Reinforcement</i> ) .....	13
2.3 Formas Comerciais dos Sistemas .....	15
2.3.1 Sistema Pré-fabricado .....	16
2.3.2 Sistema Curado “ <i>in situ</i> ” .....	17
2.3.3 Fornecedores em Portugal.....	18
2.4 Considerações Finais .....	20
 <b>CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>23</b>
3.1 Norma Europeia EN 1504 .....	24
3.2 Resinas Epoxídicas .....	25
3.2.1 Características Gerais.....	25
3.2.2 Características Específicas .....	26
3.2.2.1 Primário .....	27
3.2.2.2 Argamassa de Regularização .....	28
3.2.2.3 Adesivo e Resina de Impregnação .....	30
3.3 Laminado de FRP.....	32
3.4 Mantas/Tecidos .....	34
3.5 Comportamento a Longo Prazo .....	36

3.5.1 Durabilidade .....	36
3.5.2 História de Carga .....	40
3.6 Comportamento ao Fogo .....	42
3.7 Considerações Finais.....	43
<b>4 – PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1 Análise do Projecto.....	47
4.2 Recepção e Armazenamento .....	47
4.3 Inspeção e Reparação do Substrato .....	50
4.3.1 Inspeção e Avaliação .....	50
4.3.2 Reparação do Substrato .....	56
4.4 Preparação e Verificação da Superfície .....	59
4.5 Manuseamento de Resinas Epoxídicas .....	65
4.6 Aplicação do Compósito de FRP .....	71
4.6.1 Laminado de FRP .....	71
4.6.2 Compósito de FRP Curado “ <i>in situ</i> ” .....	76
4.6.2.1 Impregnação no Substrato .....	77
4.6.2.2 Impregnação Prévia.....	79
4.7 Reparação de Não Conformidades .....	81
4.8 Protecção do Compósito de FRP .....	82
4.8.1 Tipos de Protecção .....	83
4.8.2 Inspeção à Protecção Aplicada.....	85
4.9 Considerações Finais.....	86
<b>5 – CONTROLO DE QUALIDADE.....</b>	<b>89</b>
5.1 Fase de Execução do Reforço.....	90
5.1.1 Análise do Projecto .....	90
5.1.2 Qualificação das Empresas .....	91
5.1.3 Inspeção dos Materiais .....	92
5.1.3.1 Recepção.....	92

5.1.3.2 Conservação em Obra .....	94
5.1.4 Preparação do Substrato de Betão .....	94
5.1.4.1 Inspeção do Substrato .....	94
5.1.4.2 Verificação da Superfície .....	96
5.1.5 Manuseamento de Resinas Epoxídicas .....	98
5.1.6 Aplicação do Compósito de FRP .....	99
5.2 Fase Pós-execução do Reforço .....	101
5.2.1 Inspeção Visual .....	102
5.2.2 Ensaaios em obra .....	103
5.2.2.1 Ensaaios Não Destrutivos (NDT) .....	104
5.2.2.2 Ensaaios Semi-destrutivos (SDT) .....	107
5.2.3 Ensaaios em Laboratório .....	109
5.3 Considerações Finais .....	111
<b>6 – PASSAGEM INFERIOR 10 DO IC 24 .....</b>	<b>113</b>
6.1 Tarefas Realizadas .....	114
6.2 Fase de Execução do Reforço .....	115
6.2.1 Observação e Acompanhamento .....	116
6.2.2 Recolha das Amostras .....	117
6.2.2.1 Execução de Provetes de Resina .....	117
6.2.2.2 Execução do Provete de Compósito de FRP Curado “ <i>in situ</i> ” .....	120
6.2.3 Execução de Zonas de Amostragem .....	121
6.3 Fase Pós-execução do Reforço .....	122
6.3.1 Inspeção Visual ao Sistema Aplicado .....	123
6.3.2 Ensaaios de <i>Pull-off</i> .....	123
6.3.3 Ensaio <i>Tap Test</i> .....	125
6.3.4 Ensaaios em Laboratório .....	125
6.4 Considerações Finais .....	131

<b>7 – CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>133</b>
7.1 Conclusões Gerais .....	133
7.2 Desenvolvimentos Futuros .....	134

## Glossário

De seguida expõe-se uma lista dos significados dos termos mais comuns utilizados na área do reforço com sistemas compósitos de FRP.

**Aderência** – Envolve os conceitos de adesão e de coesão dos sistemas com ligações coladas. Traduz-se pela tensão máxima necessária para separar dois materiais colados, segundo uma junta. Como sinónimo apresenta-se o termo resistência de aderência.

**Adesivo** – É a substância constituinte dos sistemas pré-fabricados responsável pela colagem do laminado de FRP ao substrato de betão.

**Argamassa de regularização (*Putty*)** – Produto de base polimérica cujo objectivo é a eliminação de pequenas irregularidades na superfície do betão, com vista a evitar a formação de bolhas de ar e a garantir uma superfície lisa para a colagem do compósito de FRP.

**Argamassa de reparação** – Produto de base cimentícia cujo objectivo é a reconstrução da secção de betão após a remoção de porções deterioradas.

**Carbono** – Fibra produzida por tratamento térmico das fibras de precursor orgânico, como as "PAN" (poliacrilonitrilo) e as *pitch* (derivado do petróleo destilado), numa atmosfera inerte.

**Compósito de FRP** – Material que contém dois (fibra e matriz) ou mais constituintes quimicamente distintos com uma interface definida a separá-los. Ver FRP.

**Cura** – Ou polimerização é o processo químico de alteração irreversível das propriedades de uma resina termoendurecível. Neste contexto a cura é proporcionada por adição de um agente de cura ou catalizador (endurecedor), com ou sem aquecimento (ou pressão). Reacção química entre o oxigénio da resina e o hidrogénio das aminas contidas no endurecedor.

**Delaminação** – Separação segundo um plano paralelo à superfície.

**Durabilidade** – Habilidade do material de manter as suas propriedades físicas e mecânicas sob acções climáticas, ataque químico e outras agressões a que possa ser sujeito durante o seu período de serviço.

**Endurecedor** – Agente que proporciona a polimerização (ou cura) quando adicionado a uma resina termoendurecível.

**Ensaio de *pull-off*** – Designação internacional para o ensaio de arrancamento por tracção, especificado na EN 1542.

**Fibra** – Termo geral para designar os materiais filamentosos que representam a componente de resistência e de rigidez num compósito de FRP.

**Filler** – Substância relativamente inerte adicionada à resina para melhorar algumas das suas características de resistência e trabalhabilidade, assim como, para baixar os custos.

**FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)** – Sigla da família geral dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras. Contudo, há autores portugueses que se referem a esta como PRF (Polímeros Reforçados com Fibras).

**Interface** – Define a fronteira, a junta ou a superfície entre dois materiais diferentes. Existem, como exemplo, os casos das juntas betão-adesivo, adesivo-compósito ou betão-adesivo-compósito.

**Laminado de FRP** – Resulta, sobretudo, da conjugação de uma matriz polimérica, termoendurecível ou termoplástica, com uma elevada percentagem de fibras contínuas de reforço de modo a incrementarem resistência ou rigidez numa direcção, consolidados por um processo de pultrusão.

**Manta** – Agrupamento de fibras com disposição de faixas contínuas e paralelas (unidireccionais) sobre uma rede simples de protecção e/ou com espalhamento de uma resina de pré-impregnação.

**Matriz** – Componente do compósito de FRP que é constituída à base de uma resina homogénea ou um material polimérico, de natureza dúctil, que envolve completamente as fibras de reforço.

**Mistura** – Neste documento é o produto, ainda não curado, da junção dos componentes da resina.

**Polimerização** – Pode ser interpretada o mesmo que cura.

**Primário** – Este produto destina-se a completar e melhorar o desempenho de todo o sistema compósito de FRP. Apresenta a característica de penetrar no betão por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para a recepção da resina de impregnação ou do adesivo.

**Pultrusão** – Processo contínuo que combina as acções de tracção e extrusão para a produção de um compósito, com secção final constante. Os fios contínuos embebidos em resina são esticados e passados por uma fieira aquecida, para processar a cura e a forma do compósito de FRP. Apresenta-se como o processo mais utilizado na execução dos laminados de FRP.

**Resina** – Componente de um sistema polimérico, que requer a adição de um catalizador ou um endurecedor, para se iniciar o processo de polimerização (ou cura) num compósito. Pode ser referida, também, como a matriz dum compósito de FRP.

**Resina epoxídica** – Resina formada por reacções químicas de grupos epóxidos com aminas, álcool, fenol e outros. É a matriz mais usada nos compósitos de FRP curados “*in situ*” e o tipo de adesivo comumente empregue nas colagens de elementos da construção civil.



**Resina de impregnação** – É a substância constituinte dos sistemas curados *"in situ"* responsável pela impregnação das fibras, constituindo-se assim o compósito de FRP, e pela colagem deste ao substrato de betão.

**Sistema compósito de FRP** – Conjunto materiais e/ou produtos necessários à execução de um reforço.

**Sistema curado *"in situ"*** – É uma forma comercial de sistemas compósitos de FRP constituída por fibras contínuas, com a forma de mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado e por uma resina de impregnação. Nesta forma comercial só se obtém o compósito de FRP propriamente dito, após a execução do reforço no local, isto é, polimerizado ou endurecido *"in situ"* com a adição da resina de impregnação das fibras e, simultaneamente, o agente adesivo de ligação ao material a reforçar.

**Sistema pré-fabricado** – É uma forma comercial de sistemas compósitos de FRP constituída por compósitos de FRP e pelo adesivo. O compósito de FRP fornecido é portanto um produto finalizado (já curado), com características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores e com a forma corrente de laminados.

**Substrato (de betão)** – É o betão existente ou argamassa de reparação, ou ainda, uma junção dos dois, ou seja, é o material constituinte do elemento a reforçar. O substrato é delimitado pela superfície onde o sistema compósito de FRP vai ser aplicado.

**Superfície (de betão)** – É a camada exposta do betão sobre a qual se aplicam os produtos de colagem.

***Shelf time*** – Intervalo de tempo durante o qual a resina, dentro das suas embalagens originais, se mantém as propriedades especificadas e continua adequada para o uso a que é destinada.

**Tecido** – Agrupamento de faixas de fibras contínuas dispostas em mais de uma direcção sobre uma rede simples de protecção e/ou com espalhamento de uma resina de pré-impregnação.

**Temperatura crítica** – Temperatura limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção civil, a partir da qual se inicia a redução acentuada das principais propriedades mecânicas dum polímero, como a resistência e a rigidez.

**Temperatura de transição vítrea (Tg)** – Temperatura limite nos polímeros (adesivos e resinas), acima da qual se proporciona a passagem dum estado vítreo frágil para um sólido elástico e dúctil. A aproximação da temperatura para este nível do valor, torna a componente polimérica muito macia e as principais propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, diminuem acentuadamente. Pode ser determinada recorrendo a ensaios de DSC ou de DMTA.

**Tempo de utilização (*pot life*)** – Intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade. Esgotado o tempo de utilização, qualquer mistura de resina perde drasticamente as suas características de aderência, pelo que não deve ser usada.

**Tixotropia** – Propriedade do adesivo que permite seu amolecimento após agitação e endurecimento sob descanso. Materiais tixotrópicos apresentam elevada resistência estática ao cisalhamento e reduzida resistência dinâmica ao cisalhamento ao mesmo tempo. Estes materiais perdem sua viscosidade sob tensão.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Enquadramento

O reforço e a reabilitação estrutural têm vindo a assumir, ao longo das últimas décadas, uma crescente importância na actividade da construção civil. Facto esse ditado por variadíssimas razões das quais se destacam, pela sua maior ocorrência, as alterações dos requisitos estruturais previstos na fase de projecto (aumento do espectro de cargas, sujeição a novas exigências normativas, etc.), a degradação prematura dos materiais estruturais, os problemas resultantes de erros de concepção e de construção e o facto de muitas estruturas de betão armado (o material mais amplamente utilizado na construção) estarem a atingir o fim do período de vida previsto. Acrescem ainda as razões relacionadas com a recuperação estrutural face à ocorrência de acções acidentais como a acção sísmica e a acção fogo.

Os técnicos da construção civil, incumbidos de dar resposta às necessidades originadas pelas referidas razões, foram impulsionados a desenvolver novos métodos capazes de aumentar a viabilidade do processo de reforço e de reabilitação estrutural, assim como, de o tornar mais ágil. Procuraram que o seu campo de utilização fosse ampliado e que os seus tempos de intervenção e custos associados, tanto de aplicação como de manutenção, fossem reduzidos.

Surge assim a técnica de reforço por colagem exterior de Sistemas Compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). A sua crescente aplicação tem vindo a confirmar o facto de ser uma alternativa com um enorme potencial, fundamentado pelas suas inegáveis vantagens em termos de durabilidade, facilidade e simplicidade de aplicação e de excelente desempenho mecânico. Esta técnica revela-se muitas vezes como a mais apropriada para responder às exigências impostas por ambientes de grande agressividade, assim como, para resolver delicados requisitos estruturais, não só pelas já mencionadas, vantagens mecânicas, como por os seus custos serem comparativamente mais reduzidos que as intervenções de reforço estrutural tradicionais.

Foi também rapidamente evidenciado pela experiência que o êxito do reforço e da reabilitação recorrendo aos sistemas compósitos de FRP depende em larga escala da sua boa execução, ou seja, na correcta

colagem do compósito ao substrato a reforçar. Neste domínio e apesar do esforço desenvolvido por numerosos investigadores, o facto é que esta é uma técnica relativamente recente o que implica que ainda não exista em Portugal documentação específica e devidamente normalizada em relação aos procedimentos de aplicação. Este facto, a par da crescente oferta de sistemas compósitos de FRP disponibilizados por, também cada vez mais, fabricantes, tem incrementado a dificuldade em obter consenso e sistematização dos procedimentos de execução de um reforço recorrendo a estes sistemas.

Estes factos resultam em desconforto e apreensão por parte de todos os técnicos potencialmente envolvidos na sua utilização, sejam eles projectistas, construtores ou fiscais.

## 1.2 Objectivos

O exposto no ponto anterior justifica a necessidade de criar um documento que permita um uso mais inteligível e em todo o seu potencial dos sistemas compósitos de FRP. Que faculte ao projectista uma base para a elaboração das especificações técnicas, a incluir no caderno de encargos, que o faça sentir confiante no desempenho do previsto no seu projecto e que possa guiar o empreiteiro responsável pela aplicação do sistema e a fiscalização que está incumbida de o validar.

Nesse sentido, os principais objectivos que direccionaram o desenvolvimento do presente trabalho foram:

- Pretendeu-se que o documento fosse um reflexo do estado actual dos conhecimentos na matéria a que se refere, procurando-se considerar não só o especificado nos mais importantes regulamentos vigentes no contexto internacional (especialmente a recente norma EN 1504) como também as recomendações dos fabricantes e a investigação desenvolvida por distintos grupos de trabalho, tanto pertencentes a universidades como a outras instituições com intervenção na presente área;
- A caracterização dos materiais constituintes dos sistemas compósitos de FRP, através da identificação das propriedades relevantes para a aplicação a que se destinam e do discernimento das normas indicadas para o quantificar;
- A descrição de todos os passos a seguir para a correcta execução do reforço, apontando e destringendo as tarefas que, quer pela sua importância quer pela sua dificuldade, exijam cuidados especiais;
- A definição de um controlo de qualidade que, sustentando em ensaios, possa garantir o funcionamento desejado pelo projectista para o reforço;
- Confrontar e assim validar todo o trabalho com um caso prático que será a obra de reforço da Passagem Inferior (PI) 10 do grupo de Obras de Arte da Scut do Grande Porto IC24 procurando assim garantir que todo o trabalho desenvolvido fosse ao encontro da realidade em obra de modo a constituir uma ferramenta prática e tangível para o reforço recorrendo a estes sistemas;

- No final do desenvolvimento do trabalho apontar os “pontos críticos” de todo o processo de construção de um reforço de estruturas com sistemas compósitos de FRP.

### 1.3 Organização

De acordo com os objectivos propostos, a dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, o primeiro é a presente introdução onde se enquadra e justifica o trabalho desenvolvido assim como os seus objectivos. Nos parágrafos seguintes descrevem-se sumariamente os restantes capítulos.

No Capítulo 2 apresenta-se o sistema compósito de FRP e a técnica de reforço por colagem exterior. Procura-se identificar as características mais relevantes dos materiais constituintes dos sistemas, sensibilizando para as implicações dessas mesmas características no desempenho do sistema. Expõe-se também a técnica de colagem exterior procurando elucidar quanto à sua aplicabilidade e cuidados gerais. O Capítulo termina com a apresentação das principais formas comerciais destes sistemas.

O Capítulo 3 tem como objecto a definição das propriedades a exigir aos materiais para que estes cumpram com os seus propósitos e enunciar cuidados a ter relativamente ao seu manuseamento. Apresentam-se assim quais as propriedades que deverão ser observadas e quais os valores que estas deverão assumir. É também abordada a questão do comportamento a longo prazo, assim como, do seu comportamento em relação à acção fogo. Pretende-se que este capítulo constitua uma base para a redacção das especificações técnicas dos materiais a integrar o caderno de encargos do projecto de reforço.

No Capítulo 4 descrevem-se todos os procedimentos do processo de construção de um reforço pela técnica de colagem exterior desde o seu início, com a análise do projecto, até ao seu fecho com a sua inspecção final e a aplicação da protecção. Durante essa descrição procura-se alertar para os procedimentos considerados como críticos. À semelhança do capítulo anterior pretende-se que esta informação constitua uma base para a redacção das especificações técnicas de execução a integrar o caderno de encargos do projecto de reforço. Também se procura que constitua um “manual” para a construção do reforço para consulta dos aplicadores e fiscalização.

No Capítulo 5 apresenta-se uma proposta para o controlo de qualidade da construção de um reforço recorrendo aos sistemas compósitos de FRP. Neste acompanham-se os pontos considerados como críticos e mais importantes para o sucesso da operação de reforço. Discutem-se também os ensaios para a avaliação e validação da operação de reforço. Ao longo do capítulo vão-se apresentando as listas de verificação que pretendem sistematizar o controlo de qualidade.

O Capítulo 6 é relativo ao acompanhamento da execução da obra de reforço da Passagem Inferior (PI) 10 do grupo de Obras de Arte da Scut do Grande Porto IC24. Apresenta-se a implementação do controlo de qualidade e a forma como este decorreu, salientando-se as dificuldades e as principais ilações quanto à sua aplicabilidade.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões a retirar do trabalho desenvolvido e são também propostas algumas sugestões visando desenvolvimentos.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS COMPÓSITOS DE FRP E TÉCNICA DE COLAGEM EXTERIOR

Neste capítulo apresentam-se os sistemas compósitos de FRP, expondo-se quais os seus materiais constituintes e as suas principais características salientando-se aquelas que se consideram mais relevantes. De seguida aborda-se a técnica de colagem exterior realçando a suas potencialidades e as principais precauções na sua aplicação. Por fim, expõem-se as principais formas de comercialização destes sistemas e a sua representação em Portugal.

#### 2.1 Sistemas Compósitos de FRP

Entende-se como sistema compósito de FRP o conjunto de materiais necessários à execução de um reforço de um elemento estrutural recorrendo a fibras, contínuas orgânicas ou inorgânicas, dispostas unidireccionalmente ou multidireccionalmente. Este é sobretudo constituído pela armadura, geralmente em fibras de carbono, vidro ou aramida (*Kevlar®*), responsável pelo incremento de resistência do elemento e pelo adesivo (resina epoxídica) encarregue da colagem da armadura ao elemento a reforçar e da subsequente transmissão de esforços entre os dois (Juvandes, 1999).

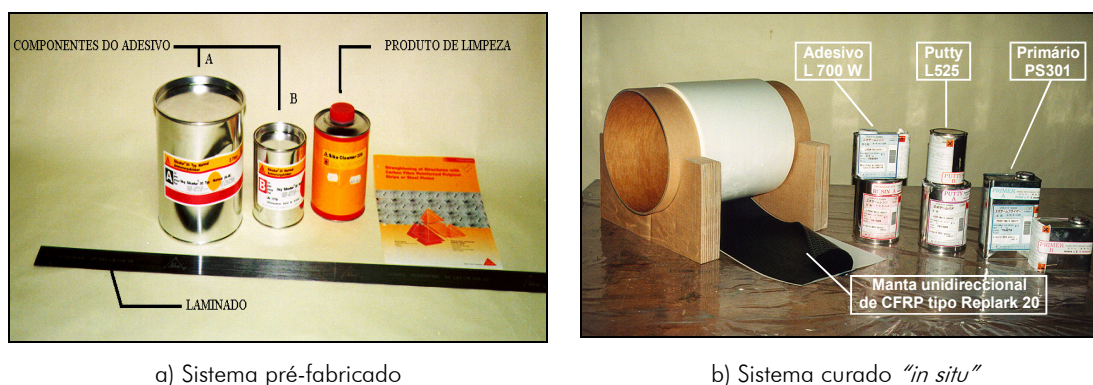
Dentro das várias possibilidades apresentadas para o material que constituirá a armadura do reforço, as fibras de carbono são as mais utilizadas. Estas, para a grande maioria dos casos de reforço estrutural, são aquelas que apresentam as características que melhor se adequam aos requisitos mecânicos requeridos. Esta questão será abordada e justificadas no ponto 2.1.1.

Alguns sistemas incorporam, para além dos produtos já mencionados, outros para a preparação da superfície do elemento a reforçar, tais como a argamassa de regularização (*putty*) e o primário, cujo objectivo é o de reconstruir e melhorar as propriedades de aderência da superfície e assim o desempenho final do reforço.

Salienta-se que apenas são considerados como produtos constituintes dos sistemas aqueles que são necessários ao reforço propriamente dito, sendo que não se incluem os materiais que poderão ser

eventualmente necessários para a reparação do substrato como os inibidores de corrosão, a argamassa de reparação, etc.

Embora a sua apresentação seja o objecto do ponto 2.3, elucida-se aqui, que a comercialização dos sistemas compósitos de FRP é feita sobre duas formas distintas. Com efeito, consoante o agrupamento dos materiais constituintes, existem os sistemas pré-fabricados e os sistemas curados *"in situ"*, como exibido na Figura 2.1.



a) Sistema pré-fabricado

b) Sistema curado *"in situ"*

Figura 2.1 – Sistemas compósitos de FRP (Juvandes, 1999).

Nos pontos que se seguem vão ser expostas as características e propriedades dos materiais e produtos que estão na base dos sistemas compósitos de FRP.

### 2.1.1 Fibra

A fibra é o material constituinte dos sistemas compósitos de FRP que é responsável pela resistência e rigidez necessária a um reforço estrutural.

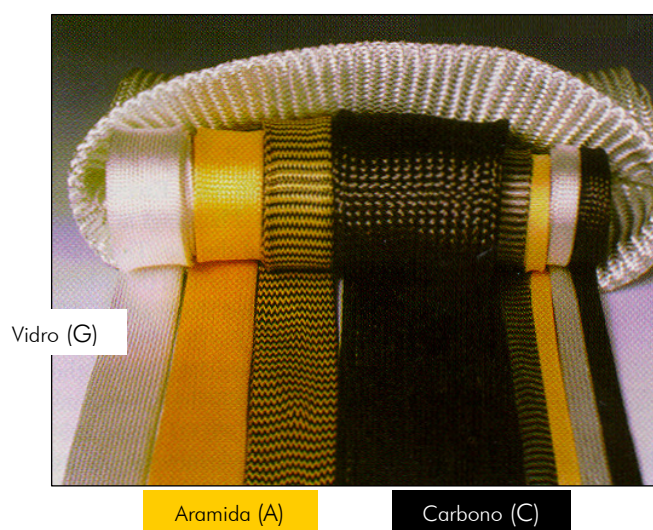


Figura 2.2 – Cores dos diferentes tipos de Fibras (Juvandes, 2005).



Como já referido, as fibras comumente utilizadas para a execução de reforços em elementos estruturais são de carbono (C), de vidro (G) e de aramida (A) (*kevlar®* (K)). Como ilustrado na Figura 2.2 estas distinguem-se visivelmente pela sua cor. As fibras de carbono apresentam cor preta, as fibras de aramida cor amarela e as fibras de vidro cor branca.

Mecanicamente, o seu comportamento é perfeitamente elástico, não apresentando uma tensão de cedência e deformação plástica (em oposição ao exibido pelo aço), classificando as fibras como um material frágil.

As fibras, no geral, exibem grandes vantagens físicas e químicas relativamente ao seu concorrente directo, o aço. Estas são praticamente inertes às agressões ambientais, conseguem tolerar altas temperaturas e os ambientes mais corrosivos, independentemente da sua resistência ou rigidez (fib Bulletin nº14, 2001; ACI 440.2R-02, 2002).

Por sua vez, dentro das fibras, o carbono destaca-se por exibir uma resistência e rigidez específicas muito superiores aos restantes materiais. O que justifica, em grande parte, a sua maior utilização no âmbito do reforço estrutural.

Dependendo da técnica e temperatura da sua produção existem diferentes tipos de fibras de carbono que apresentam diferentes propriedades mecânicas. Usualmente discriminam-se dois tipos, aquelas que exibem alto módulo de elasticidade na ordem de  $E_f \approx 640$  GPa, com a designação "HM" (*high-modulus*), e as que apresentam alta resistência, de sigla "HS" (*high-strength*) (geralmente com  $E_f \approx 200$ -230 GPa).

Através do gráfico da Figura 2.3 e da Tabela 2.1 conseguem-se visualizar as diferenças entre as principais características mecânicas (módulo de elasticidade, resistência e deformação máximas) das diferentes fibras e do aço.

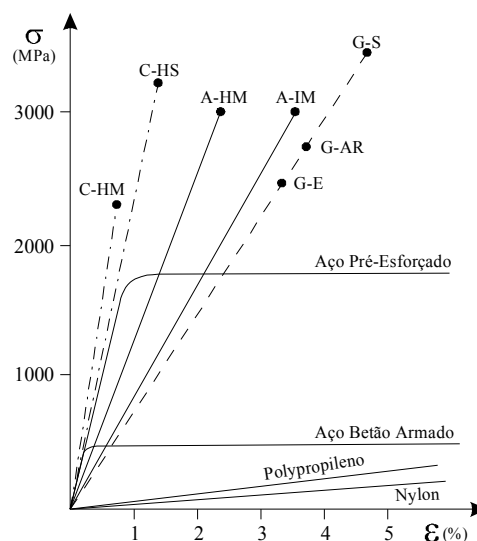

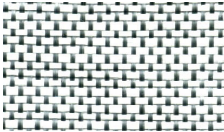



Figura 2.3 – Resistência, deformação e rigidez das fibras e do aço (ACI 440R-96, 1996).

Tabela 2.1 – Características mecânicas e cores das fibras dos sistemas FRP (Juvandes, 2007).

Tipo de fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência última (MPa)	Deformação última (%)	Cor
<u>Carbono</u>				
Corrente	220-235	2050-3790	> 1.2	
Alta resistência	220-235	3790-4825	> 1.4	
Elevada resistência	220-235	4825-6200	> 1.5	
Módulo alto	345-515	1725-3100	> 0.5	
Módulo elevado	515-690	1375-2410	> 0.2	
<u>Vidro</u>				
Vidro E	69-72	1860-2685	> 4.5	
Vidro S	86-90	3445-4825	> 5.4	
<u>Aramida</u>				
Corrente	69-83	3445-4135	> 2.5	
Elevado desempenho	110-124	3445-4135	> 1.6	

Salienta-se ainda que as fibras utilizadas neste âmbito são contínuas e alinhadas, tendo a sua resistência à tracção e o seu módulo de elasticidade máximos na direcção do seu alinhamento. É assim possível a sua orientação numa direcção específica pretendida permitindo a optimização do seu desempenho mecânico.

### 2.1.2 Adesivo/Resina

Os sistemas compósitos de FRP incluem, para além da armadura (fibras ou compósito de FRP), o agente responsável pela sua colagem aos elementos a reforçar, designado por adesivo no caso dos sistemas pré-fabricados e por resina de impregnação no caso dos sistemas curados “*in situ*”. Tanto o adesivo como a resina de impregnação são, como já referido, resinas epoxídicas.

A escolha de resina epoxídicas, em preterição de outras resinas tais como o poliéster ou o vinilester, justifica-se por ser aquela que exhibe uma maior tolerância à alcalinidade do betão, assim como à humidade. Para além destas importantes vantagens, apresenta também, uma resistência coesiva elevada, retracção mínima durante a cura, baixa fluência, podendo ainda ser formulada para exhibir uma tixotropia que possibilite a aplicação em superfícies verticais (Mays et al., 1992; Fonseca, 2005).

As resinas presentes nos sistemas são fornecidas em componentes separados (Figura 2.4). Estes componentes são misturados apenas no momento de aplicação e nas proporções especificadas nas suas fichas técnicas. Os dois componentes principais são a resina propriamente dita (componente A) e o endurecedor (componente B) que, após a sua mistura, reage com o primeiro originando a polimerização. As resinas podem ainda integrar outros componentes, denominados aditivos, com o objectivo de manipular as suas propriedades físicas e mecânicas durante a aplicação e após a sua cura.

Dos aditivos, destacam-se pelo seu maior uso os *fillers*. Estes são geralmente materiais inertes como areia ou sílica e são utilizados para reduzir os custos (onde está o *filler* não está resina) e modificar as suas

propriedades mecânicas e físicas. De facto, da sua utilização, resulta uma redução da fluência, da retracção e do coeficiente de expansão térmica, no entanto também resulta um aumento da viscosidade da mistura fresca o que poderá comprometer o seu comportamento tixotrópico (necessário em aplicações verticais).



a) Componentes A e B do adesivo e da resina

b) filler

Figura 2.4 – Componentes de adesivos/resinas.

As propriedades finais da resina epoxídica não dependem apenas da constituição química dos seus componentes. A junção dos mesmos componentes podem originar resinas com propriedades distintas em função do grau de polimerização atingido, ou seja, maior reacção química entre o oxigénio da resina e o hidrogénio das aminas contidas no endurecedor. Assim, o processo de mistura da resina com o endurecedor é determinante para a quantidade de moléculas do segundo que estabelecem ligação com as moléculas da primeira. A densidade destas ligações e, consequentemente, o grau de endurecimento da resina, depende também das condições ambientais no momento da cura, como a temperatura e a humidade. Portanto o maior ou menor desempenho da resina variará com o adequado controlo destes. De facto, o aumento do número de ligações da resina traduz-se num incremento do módulo de elasticidade, resistência e numa maior estabilidade térmica e resistência à agressão química.

Nesse sentido, com vista a maximizar as reacções em ambientes de diferentes temperaturas e humidades, existem no mercado uma grande variedade de formulações epoxídicas específicas para as diferentes condições de aplicação.

Das características das resinas epoxídicas (e dos polímeros em geral), existe uma, que pela sua importância, importa ser já realçada. Esta é a exibição de uma temperatura limite, designada por temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), que ao ser atingida propicia a passagem dum estado sólido, vítreo e frágil para um estado elástico e dúctil. A importância desta característica reside no facto de a  $T_g$  da resina poder ser mais baixa que a temperatura ambiente (em tempo quente). A consequência deste amaciamento da resina é a diminuição acentuada das suas principais propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, com as óbvias repercussões sobre o desempenho do reforço.

Esta característica está representada na Figura 2.5, através das curvas típicas de variação do módulo de elasticidade  $E'$  (módulo de ganho) e do desenvolvimento do coeficiente de perda  $\tan \delta = E''/E'$  (razão entre o módulo de perda e o de ganho) com a temperatura.

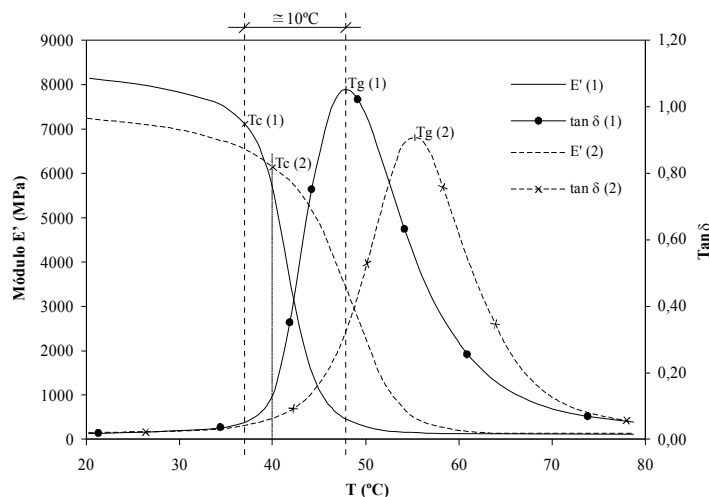
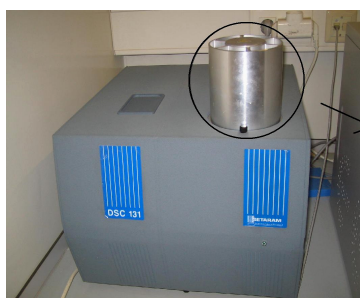


Figura 2.5 – Efeito da temperatura no comportamento de uma resina (DMTA) (Juvandes, 1999).

Os ensaios mais comumente utilizados para a avaliação da  $T_g$  são o ensaio DSC (cuja realização deve ser de acordo com a norma ISO 11357, Part 1, 1997 e Part 2, 1997) e o ensaio DMTA (cuja realização deve ser de acordo com a norma ISO 6721 Part 1, 1994). Na Figura 2.6, ilustram-se os equipamentos para a execução dos referidos ensaios.



a) Ensaio de DSC



b) Ensaio de DMTA

Figura 2.6 – Vista geral dos equipamentos usados nos ensaios.

Do ponto de vista do comportamento estrutural da resina interessa estabelecer uma temperatura de referência de segurança em que a resina ainda se encontra com as necessárias propriedades mecânicas. Essa temperatura é denominada por temperatura crítica  $T_c$  e é assim o limite superior da temperatura esperada na resina exposta aos agentes ambientais da construção. Esta temperatura crítica varia consoante o tipo de resina usada. Algumas publicações internacionais e o recente estudo de Juvandes et al., 2006 recomendam a fixação de um valor de  $T_c$  inferior ao valor da temperatura  $T_g$  de 10°C a 20°C.

### 2.1.3 Compósito de FRP

Um compósito de FRP resulta, sobretudo, da conjugação de fibras contínuas com uma resina termoendurecível, a matriz. Como constituintes secundários, estes materiais podem possuir aditivos como os *fillers* e agentes catalizadores.

Os compósitos de FRP que integram os sistemas compósitos de FRP usados no reforço por meio da técnica de colagem são comercializados em duas formas distintas consoante se tratem de sistemas pré-fabricados e de sistemas curados *"in situ"* (Figura 2.7). Estas duas formas diferem nos materiais e nos procedimentos de aplicação e exibem vantagens e desvantagem entre ambas, como no próximo ponto se aclara (Juvandes, 1999; fib Bulletin nº14, 2001; ACI 440.2R-02, 2002).

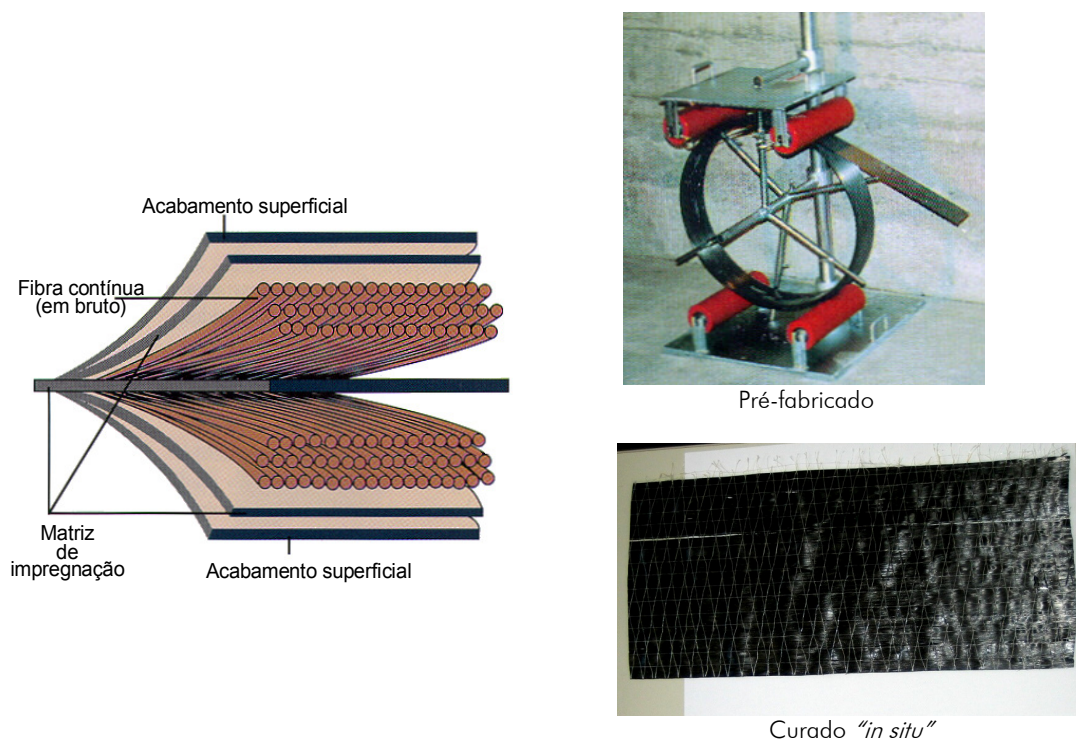


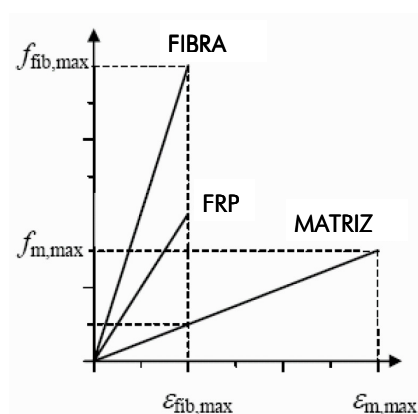
Figura 2.7 – Compósito de FRP (formas pré-fabricada e curada *"in situ"*)

O comportamento final do compósito de FRP é, de forma óbvia, dependente das propriedades dos materiais que o constituem, do seu teor e da disposição das fibras principais de reforço. No entanto é importante também ter presente que o seu processo de fabrico vai condicionar largamente as suas propriedades finais. Como se poderá intuir facilmente um compósito de FRP pré-fabricado formado por um processo controlado como o de pultrusão não irá certamente apresentar as mesmas características de um compósito curado *"in situ"*.

Dos constituintes do compósito de FRP a fibra será naturalmente o material que mais vai condicionar o resultado das propriedades mecânicas mais relevantes do compósito. A matriz, no entanto, apesar de não ser preponderante para essas propriedades, tem um papel muito importante no desempenho global do

compósito de FRP. De facto, a transmissão de esforços entre fibras, que possibilita o seu comportamento em conjunto, é proporcionado pela matriz. A resistência ao corte, interlaminar e no plano do compósito de FRP são maioritariamente dependentes das propriedades da resina que a constitui. Fornece ainda o necessário suporte físico contra a instabilidade das fibras quando o compósito se encontra sob acções de compressão. Refira-se finalmente que a durabilidade do compósito de FRP vai depender directamente da matriz pois é esta que constitui a barreira física contra potenciais agressões tanto ambientais como mecânicas.

Como se pode observar na Figura 2.8 (relação tensão – extensão), a rigidez do compósito de FRP é inferior à rigidez das fibras quando estas se encontram isoladas. Como a partir da extensão última das fibras não é possível a transmissão de esforços entre estas e a Matriz, a extensão última do compósito de FRP coincide com a das fibras.



#### FIBRA

$f_{fib}$  – Tensão

$\epsilon_{fib}$  – Extensão

#### MATRIZ

$f_m$  – Tensão

$\epsilon_m$  – Extensão

#### FRP

$f_f$  – Tensão

$\epsilon_f$  – Extensão

Figura 2.8 – Rigidez e extensão máxima das fibras, matriz e FRP (CNR-DT 200, 2005).

Como referido, as propriedades mecânicas do compósito de FRP são ditadas pelo tipo de fibra e pela percentagem volumétrica da mesma. O gráfico da Figura 2.9 (relação tensão – extensão) que se segue ilustra a variação da rigidez do compósito de FRP consoante a percentagem de fibras, verificando-se que o aumento desta percentagem conduz a um aumento de rigidez do compósito de FRP.

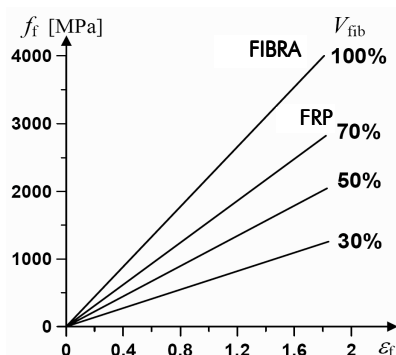


Figura 2.9 – Rigidez do FRP em função da percentagem de fibras (CNR-DT 200, 2005).



## 2.2 Técnica de Colagem Exterior (*Externally Bonded Reinforcement*)

A técnica de reforço por colagem exterior (sigla EBR) de um sistema compósito de FRP, a mais utilizada nesta área, consiste na colagem da armadura de reforço, em fibra contínua, à superfície do elemento a reforçar através de uma resina de base epoxídica (Figura 2.14).

Esta técnica destina-se sobretudo para o incremento da capacidade resistente de elementos estruturais, nomeadamente no seu reforço à flexão, ao corte, à tracção ou à compressão, com acréscimo de ductilidade, mas sem alteração substancial da rigidez dos elementos correntes como lajes, vigas, paredes resistentes, muros e pilares.



Figura 2.14 – Técnicas de colagem EBR de sistemas FRP (laminado+manta).

Ainda que este documento apenas se reporte à técnica de colagem exterior EBR sem pré-esforço, salienta-se que para além desta estão em desenvolvimento outras técnicas especiais de reforço, destacando-se dessas a técnica de reforço por colagem interior de designação internacional “*near-surface mounted reinforcement*” (sigla NSM), que consiste em colar pequenas faixas de compósito de FRP em sulcos previamente abertos na camada de recobrimento do betão (Figura 2.15) (fib Bulletin nº14, 2001; Barros et al., 2006). A aplicação de pré-esforço é possível em ambas as técnicas.



Figura 2.15 – Técnicas de colagem NSM de sistemas compósitos de FRP (laminado ou varões).

A técnica de reforço por colagem exterior, pela versatilidade que o baixo peso e maneabilidade das fibras proporcionam, assim como, pela facilidade e simplicidade de aplicação, pode ser amplamente utilizada na execução de reforços com as mais diversas configurações e em adversas condições de aplicação. No esquema da Figura 2.16 podem-se visualizar muitas das possibilidades de reforço e em que tipo de elementos estruturais.

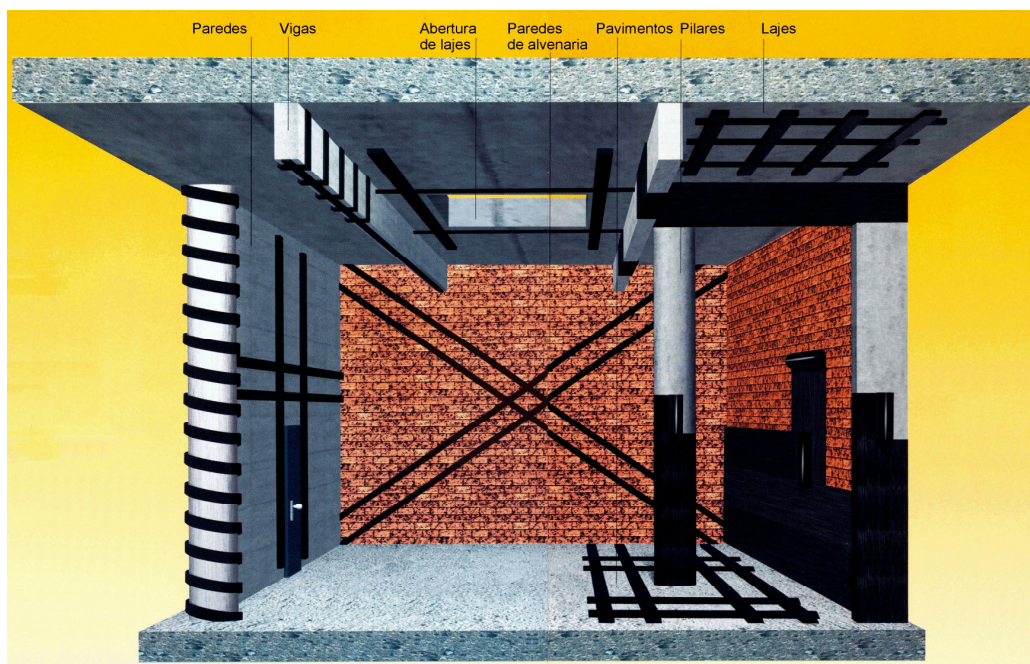


Figura 2.16 – Formas gerais dos reforços estruturais - Técnica de EBR (citado em Juvandes, 2002).

É importante também referir que apresenta, naturalmente, algumas limitações, ou melhor, algumas preocupações, a serem consideradas para que o reforço se comporte eficazmente ao longo do período de serviço da estrutura. Estas estão relacionadas com as exigências impostas ao substrato do elemento a reforçar e com o conhecimento das características das resinas face às variações higrotérmicas do ambiente.

Assim, e relativamente ao substrato (betão armado), pela necessidade de transmissão de esforços entre este e a nova armadura, é imprescindível que se apresente em condições mínimas de conservação e resistência. Especificando um pouco mais, é imprescindível que o betão do elemento a reforçar se apresente com uma resistência à tracção superficial mínima, assim como, com uma espessura de recobrimento e largura de fendas controlados, e ainda que a sua armadura não se encontre em processo de corrosão. Sublinhe-se que estas preocupações com a superfície do material a reforçar são comuns em qualquer circunstância que se opte pela técnica de colagem EBR, quer com compósitos quer com chapas metálicas ou outros materiais.

O não cumprimento inicial destes requisitos não implica obrigatoriamente a desistência da execução do reforço, pois na generalidade dos casos é possível normalizar as características do substrato através de reparações específicas. Tanto a quantificação dos limites a respeitar, como os métodos para a reparação



do substrato são abordados, de forma detalhada, no Capítulo 4, dedicado aos procedimentos de construção do reforço.

Outro ponto determinante, para o sucesso do reforço por EBR, é o controlo da temperatura máxima a que a estrutura reforçada será sujeita durante a sua vida útil, sobretudo o agente adesivo/resina de impregnação. Como já referido, a ligação da armadura de reforço ao elemento estrutural é assegurada apenas pela resina, que, ao atingir a  $T_g$ , passa do estado vítreo e rígido ao estado plástico, comprometendo por completo o funcionamento do reforço. Assim, e mais uma vez, o facto de temperaturas elevadas em serviço serem expectáveis não implica a desistência da execução de reforço, mas sim, a obrigatoriedade de implementar medidas preventivas de correcção, com por exemplo, a aplicação de uma protecção térmica eficaz, que mantenha o sistema dentro de uma temperatura máxima de segurança.

Devido à mesma característica da resina mas por outro motivo, a acção acidente fogo, também poderá ser obrigatória a adopção de disposições construtivas que garantem o funcionamento do reforço, ou seja, que mantenham este a temperaturas seguras, durante um período de tempo mínimo de segurança.

Por fim, pelo facto da armadura de reforço ser colada exteriormente, à superfície do elemento estrutural, é importante frisar a relativa vulnerabilidade a agressões mecânicas provenientes de descuido humano (exemplo de danos provocados pelo impacto de veículos ilustrados na Figura 2.17) ou mesmo de actos de vandalismo. Assim, nas aplicações de reforço em locais em que exista a possibilidade das referidas agressões deverão ser previstas medidas de protecção.

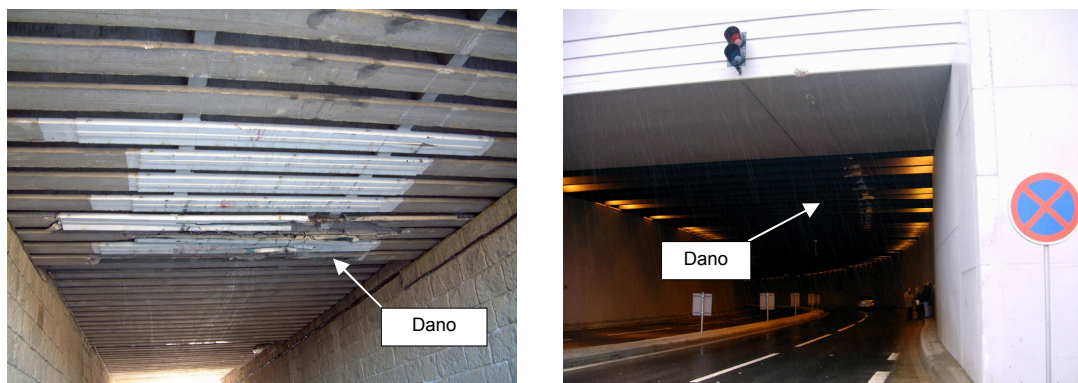


Figura 2.17 – Danos provocados pelo impacto de veículos.

## 2.3 Formas Comerciais dos Sistemas

Como já mencionado, existem duas formas comerciais para o reforço com sistemas compósitos de FRP: Sistemas Pré-fabricados (*Prefabricated Elements*) e os Sistemas Curados *"in situ"* (*Wet Lay-up Systems*). Na Tabela 2.2 apresentam-se quais os produtos constituintes de cada sistema comercial.

Tabela 2.2 – Produtos constituintes das formas comerciais dos sistemas de FRP.

Sistema Comercial	Primário	Argamassa de Regularização	Adesivo	Resina de Impregnação	FRP pultrudido	Fibras secas ou pré-impregnadas
Pré-fabricado	Opcional	Opcional	Sim	–	Sim	–
Curado “ <i>in situ</i> ”	Sim	Opcional	–	Sim	–	Sim

### 2.3.1 Sistema Pré-fabricado

Este sistema consiste na substituição das tradicionais chapas metálicas rígidas por compósitos de FRP pré-fabricados laminados semi-rígidos (*laminates, strips*). Estes compósitos de FRP, como referido no ponto 2.2.3, resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termoendurecível, consolidadas por um processo de pultrusão que é executado em fábrica com um elevado controlo de qualidade. Não é portanto necessária qualquer polimerização em obra para a sua formação. Nestes sistemas, o laminado é fornecido para obra com a geometria final (largura e espessura) estabelecida em projecto, geralmente já com o tratamento adequado para suportar a exposição ambiental.

Como o laminado exibe uma rigidez considerável, e sendo que a sua forma final é definida durante a produção, o reforço de elementos com formas não lineares torna-se mais complexo que na utilização do sistema curado “*in situ*”.

Na Figura 2.18 apresenta-se uma foto da aplicação deste sistema.



Figura 2.18 – Aplicação do sistema pré-fabricado.

### 2.3.2 Sistema Curado “*in situ*”

Esta forma comercial consiste na aplicação de feixes de fibras contínuas, Mantas (*Sheets*) ou Tecidos (*Fabrics*), ambas em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma resina epoxídica previamente espalhada na superfície a reforçar (Figura 2.19). Esta resina epoxídica é denominada de resina de impregnação e tem, como o nome indica, a função de impregnar o grupo de fibras proporcionando a polimerização do conjunto num compósito de FRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação do compósito de FRP ao material existente.



Figura 2.19 – Aplicação de um sistema curado “*in situ*”.

Como se pode observar na Figura 2.20, nas Mantas as fibras desenvolvem-se apenas na direcção longitudinal (1D) e no caso dos Tecidos as fibras desenvolvem-se em duas ou mais direcções (2D).

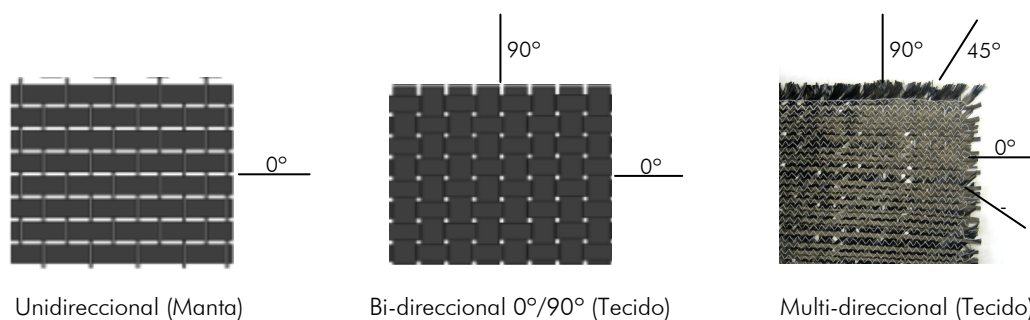


Figura 2.20 – Configurações correntes para as fibras.

Nesta forma comercial, a polimerização da matriz do compósito de FRP apenas acontece após a aplicação do sistema “*in situ*”, assim, segundo o conceito de compósito de FRP, este só existirá fisicamente após a execução do reforço.

Por a polimerização do compósito de FRP ser executada *“in situ”* é obrigatório que se proceda a cuidados especiais no processo de construção do reforço, a fim de se prevenir a ocorrência de não conformidades no compósito de FRP. De facto, e como será detalhadamente exposto no Capítulo 4, a não atenção a todas especificações e recomendações para a sua construção poderão originar a existência de vazios, enrugamentos, deformações transversais na manta/tecido, etc. Além do que a fabricação do compósito de FRP em ambiente de obra pode possibilitar uma inconveniente absorção de água, assim como, a inclusão de impurezas. Todas estas não conformidades, a ocorrerem, conduzirão a uma diminuição na eficiência do Compósito de FRP (fib Bulletin nº14, 2001; ACI 440.2R-02, 2002).

### 2.3.3 Fornecedores em Portugal

Neste ponto, apresentam-se os principais sistemas comerciais disponibilizados em Portugal até a data de fecho deste documento. Na Figura 2.21 exibe-se a forma de como alguns destes sistemas se apresentam.



Figura 2.21 – Exemplo de alguns sistemas comerciais de FRP disponibilizados em Portugal (LEMC, FEUP).

Nas Tabelas 2.3 e 2.4 identificam-se as marcas, e os seus representantes, dos sistemas presentes no mercado nacional, assim como, os produtos que estas comercializam com a respectiva referência. Considera-se importante esta reunião de informação uma vez que os fornecedores ainda se encontram dispersos e pouco divulgados. As fichas técnicas, contendo a identificação e especificação dos produtos dos sistemas apresentados nas tabelas estão reunidas no Anexo do relatório “Reforço de Estruturas por Colagem Exterior de Sistemas Compósitos de FRP – Manual de Procedimentos e de Controlo de Qualidade para Construção”.

Tabela 2.3 – Sistemas curados “*in situ*” comercializados em Portugal.

MARCA (Representante)	PRODUTO	REFERÊNCIA COMERCIAL	
BETONTEX BLEU LINE,(Conservação e Restauro de Obras de Arte, Lda.)	Putty	s/i	
	Primário	PRIMÁRIO EPOCHEM E3S + ENDURECEDOR EPOCHEM 1D E 3S	
	Resina de impregnação	RESINA EPOCHEM GC E3S + ENDURECEDOR CG 1D 3S	
	Manta ou Tecido	FTS GV330 U-HT / FTS GV220 U-HT / FTS GV160 U-HT (mantas de carbono)	
		FTS VV320 U-HT (mantas de vidro)	
		FTS PVA220 O-HT (mantas de PVA-HT)	
MAPEI (Lusomapei, S.A.)	Putty	Mapewrap 11 / Mapewrap 12 (varia com a temperatura)	
	Primário	Mapewrap Primer 1	
	Resina de impregnação	Mapewrap 21 (técnica húmida)	
		Mapewrap 31 (técnica seca)	
		Mapewrap C UNI-AX /UNI-AX HM (manta)	
		Mapewrap C BI-AX (tecido bidimensional)	
Manta ou Tecido	Mapewrap C QUADRI-AX (tecido tridimensional)		
	MBRACE (Bettor-MBT Portugal)	Putty	s/i
		Primário	MBrace Resin 50
Resina de impregnação		MBrace Resin 55	
MBRACE (BASF Construction Chemicals Portugal)	Manta ou Tecido	MBrace Mantas de Fibra (mantas e tecidos)	
	Putty	s/i	
	Primário	MBrace Resin 50 (superfícies secas)	
		MBrace PRIMER W (superfícies húmidas)	
	Resina de impregnação	MBrace Resin 55	
Manta ou Tecido	MBrace Mantas de Fibra (mantas e tecidos)		
REPLARK (EcoSpring – Estudos e Representações Técnicas, Lda)	Putty	Argamassa regularização Massa L-600	
	Primário	Primário SPS-400	
	Resina de impregnação	Resina de saturação XL-800	
	Manta ou Tecido	Replark 20, 30 e MM2 (mantas de carbono)	
	RUREDIL (Tradibau, Arquitectura e Engenharia, Lda.)	Putty	Exocem FP / PVA
Primário		Ruredil X Wrap Primer	
Resina de impregnação		Ruredil X Mesh M25 (resina inorgânica)	
		Ruredil X Wrap Resin	
Manta ou Tecido		Ruredil X Mesh C10 (mantas para alvenarias)	
	Ruredil X Wrap 310 (mantas)		
SIKA (Sika Portugal, S.A.)	Putty	Sikadur 41	
	Primário	s/i	
	Resina de impregnação	Sikadur 330	
		Sikadur 300	
	Manta ou Tecido	SikaWrap Hex 230 C (mantas)	
SikaWrap 400C HiMod NW (mantas)			
S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.)	Putty	s/i	
	Primário	S&P Resin Epoxy 50	
	Resina de impregnação	S&P Resin Epoxy 55	
	Manta ou Tecido	S&P C-Sheet 240 (mantas)	

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 2.4 – Sistemas pré-fabricados comercializados em Portugal.

MARCA (Representante)	PRODUTO	REFERÊNCIA COMERCIAL
MAPEI (Lusomapei, S.A.)	<i>Putty</i>	MAPEI Adesilex PG1
	Primário	Mapewrap Primer 1
	Adesivo	MAPEI Adesilex PG1 / Adesilex PG2 (varia com a temperatura)
	Laminado	MAPEI Carboplate
MBRACE (Bettor Portugal)	<i>Putty</i>	s/i
	Primário	MBrace Resin 50
	Adesivo	MBrace Resin 220
	Laminado	MBrace Laminado
MBRACE (BASF Construction Chemicals Portugal)	<i>Putty</i>	s/i
	Primário	MBrace Resin 50 (superfícies secas) MBrace PRIMER W (superfícies húmidas)
	Adesivo	MBrace Resin 220
	Laminado	MBrace Laminado
	Varão	MBar MBar JOINT
RUREDIL (Tradibau, Arquitectura e Engenharia, Lda.)	<i>Putty</i>	Exocem FP / PVA
	Primário	s/i
	Adesivo	Ruredil X LAM-RS 100
	Laminado	Ruredil X LAM
SIKA (Sika Portugal, S.A.)	<i>Putty</i>	Sikadur 41
	Primário	s/i
	Adesivo	Sikadur 30
	Laminado	Sika CarboDur
S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.)	<i>Putty</i>	s/i
	Primário	S&P Resin Epoxy 50
	Adesivo	S&P Resin 220
	Laminado	S&P Laminates CKF

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

## 2.4 Considerações Finais

O presente capítulo pretendeu introduzir os sistemas compósitos de FRP e a técnica de colagem exterior. Foram identificados os constituintes dos sistemas compósitos do FRP, quais suas principais características e a razão da sua integração. Explicou-se em que consiste a técnica de colagem exterior e quais as suas particularidades.

Do exposto destacam-se os seguintes aspectos:

- As fibras de carbono são as mais utilizadas como armadura dos compósitos de FRP por apresentarem as características que melhor se adequam aos requisitos mecânicos requeridos para o reforço estrutural;
- As resinas presentes nos sistemas compósitos de FRP são de base epoxídica, fornecidas em dois ou mais componentes a misturar no momento da aplicação e o seu desempenho final depende da qualidade da sua mistura;
- As resinas epoxídicas apresentam uma temperatura limite, denominada de temperatura de transição vítrea, a partir da qual passam do estado vítreo para um estado elástico, perdendo as suas propriedades mecânicas;
- Existem duas formas comerciais de sistemas compósitos de FRP, o sistema curado *"in situ"* e o sistema pré-fabricado que se distinguem, principalmente, pelo facto de que no primeiro o compósito de FRP apenas é "fabricado" no momento da aplicação do sistema;
- A técnica de reforço por colagem exterior, para ser bem sucedida, obriga ao respeito de requisitos relacionados, principalmente, com o estado do substrato destinado a receber o reforço e com as condições higrotérmicas.

Este capítulo ainda apresenta as tabelas com a identificação dos produtos disponíveis no mercado nacional, com a utilidade de reunir um mercado que ainda é bastante disperso.





## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Este capítulo tem como objecto a caracterização dos materiais constituintes dos sistemas compósitos de FRP. A informação constante neste capítulo pretende definir detalhadamente as propriedades a exigir na selecção do material para que este cumpra de forma efectiva com o seu propósito. Servirá assim de base para a redacção das especificações técnicas dos materiais constituintes de um sistema compósito de FRP a integrar nas condições técnicas especiais de um projecto de reforço com estes sistemas.

O capítulo inicia-se com a apresentação da recente norma europeia EN 1504 “Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão”, considerada de grande importância para o desenvolvimento do presente capítulo.

Passa-se de seguida a apresentar as características dos materiais responsáveis pela ligação do compósito de FRP ao substrato e à preparação da superfície, enunciando-se primeiro aquelas que são comuns a todos eles, ou seja, comuns às resinas de base epoxídica. Sucedendo-se a especificação das características de desempenho particulares de cada um deles, nomeadamente, o primário, a argamassa de regularização e o adesivo/resina de Impregnação.

De seguida, os materiais integrantes destes sistemas que constituirão a armadura de reforço, ou seja, o laminado de FRP e a manta/tecido, serão o objecto da especificação das suas características de desempenho.

Por se considerar uma questão sensível para todos os materiais de construção, o comportamento a longo prazo também é objecto deste capítulo. Aborda-se qual a variação das características e desempenho dos sistemas compósitos de FRP quando prolongadamente exposto ao ambiente e sujeito a solicitações mecânicas.

Por fim, aborda-se o comportamento ao fogo dos constituintes dos sistemas compósitos de FRP e do reforço com estes sistemas.

### 3.1 Norma Europeia EN 1504

A recente Norma Europeia EN 1504 sob o título de “Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão” constitui um importante avanço na normalização das actividades de reabilitação. Esta norma promove uma metodologia geral de reparação, desde o diagnóstico inicial, passando pela selecção da opção de reparação apropriada até às particulares especificações dos materiais. Para essa especificação, inclui ainda, a indicação das normas a utilizar para o ensaio dos produtos e sistemas.

A EN 1504 divide-se em 10 partes (esquema da Figura 3.1). As Partes de 2 a 7 são a base para uma marcação CE dos diferentes produtos e sistemas a usar na reparação de estruturas de betão. A Parte 9, não menos importante, descreve os princípios para o uso destes produtos e sistemas. A Parte 1 define os termos relacionados com o âmbito desta norma, a Parte 8 especifica procedimentos para o Controlo de Qualidade e a Avaliação da Conformidade dos produtos e sistemas e a Parte 10 prende-se com as especificações para a aplicação e para o seu controlo de qualidade.

Para permitir a marcação CE dos produtos e sistemas é necessário assegurar que todos os produtos e sistemas para a reparação do betão serão ensaiados da mesma forma. Nesse sentido, a EN 1504 faz referência a cerca de 65 normas que descrevem os métodos de ensaio para as diferentes propriedades que se querem ver controladas.

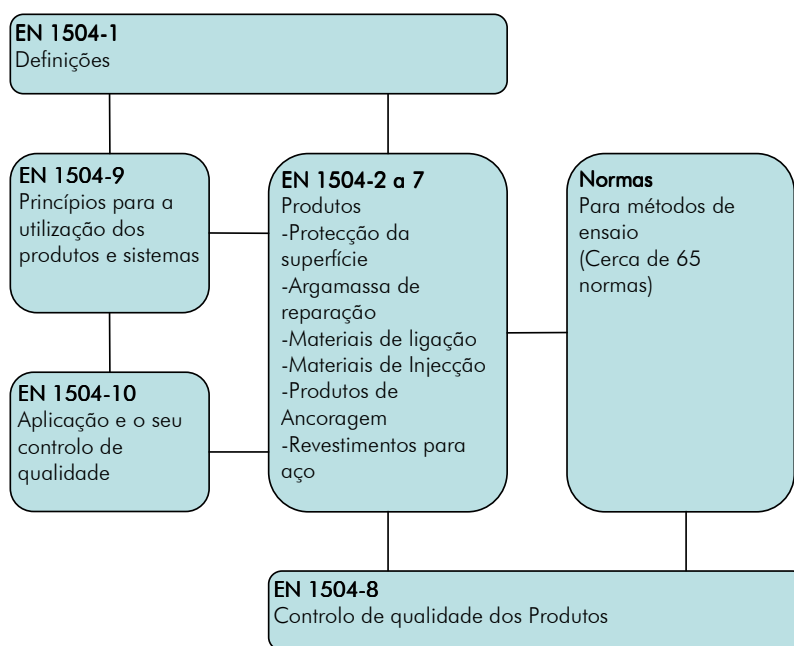


Figura 3.1 – Estrutura da EN 1504

Este capítulo prende-se com as Partes 2,3 e 4. Considera-se que o primário se identificará com um produto para a impregnação, objecto da Parte 2, que a argamassa de regularização com uma argamassa para a reparação do betão, objecto da Parte 3 e que o adesivo/resina de impregnação é o produto a utilizar para a colagem estrutural de materiais de reforço, objecto da Parte 4. No entanto, neste contexto de reforço é necessário ter presente que tanto o primário como a argamassa de regularização vão ter, para além das

funções preconizadas na EN 1504, a incumbência de transferir esforços entre o elemento reforçado e a nova armadura, uma vez que se encontram nesta interface. Também é tido em consideração que estes dois produtos, neste tipo de utilização, estão na sua grande parte “encobertos” pelo compósito de FRP não ficando directamente expostos às agressões ambientais e físicas.

## 3.2 Resinas Epoxídicas

Este ponto iniciar-se-á com a apresentação das características que são intrínsecas das resinas epoxídicas e que deverão ser consideradas aquando da sua utilização. De seguida passa-se a especificar, para cada um dos produtos, quais as características de desempenho que a observar.

### 3.2.1 Características Gerais

Como já referido no capítulo anterior, as resinas presentes nos sistemas compósitos de FRP são produtos fornecidos em dois ou três componentes distintos, a juntar no momento de aplicação. Os componentes são a resina propriamente dita, o agente catalisador (endurecedor) e no caso da argamassa de regularização poderá existir um terceiro, a carga.

Estes componentes são fornecidos em embalagens separadas e é importante, para que na sua mistura se evitem erros de dosagem, que a quantidade fornecida por embalagem, de cada componente, esteja de acordo com o seu rácio na mistura. É também aconselhável que cada componente apresente uma cor distinta para permitir um controlo efectivo da homogeneidade da mistura.

Os componentes das resinas epoxídicas apresentam alguma sensibilidade higrotérmica, por esse motivo, as suas embalagens precisam de ser devidamente armazenadas até à sua utilização, para que as suas propriedades se mantenham inalteradas. Já com essa consciência os fornecedores costumam indicar quais os cuidados a ter e quais as condições higrotérmicas limite a que estas podem estar sujeitas. Não obstante e de uma forma geral, pode-se indicar que é fundamental que estes sejam armazenados num local coberto, seco e fresco e afastados da exposição solar directa e de qualquer potencial emissor de fogo. Também nos regulamentos existentes, se reflecte a importância dos cuidados a ter no armazenamento, o NCHRP Report 514, 2004, bastante conservativo neste aspecto, indica que as embalagens não deverão estar sujeitas a temperaturas inferiores a 5 °C ou superiores a 24 °C. Ainda relativamente ao armazenamento mas por uma questão de segurança, uma vez que a resina e o endurecedor reagem exotermicamente devem ser armazenados separadamente.

Existe um período de validade (*shelf time*) dentro do qual, e se devidamente armazenados, as suas propriedades se mantêm inalteradas. Este período varia de fabricante para fabricante oscilando entre os 6 meses e os 2 anos. A consciência e o controlo deste período são de óbvia importância para os aplicadores dos sistemas.

Como já referido, as resinas pertencentes a estes sistemas são particularmente sensíveis à temperatura. Nesse sentido comercializam-se diferentes formulações com diferentes desempenhos. De facto, alguns fabricantes disponibilizam resinas de Verão e de Inverno no sentido de alargar as possibilidades de aplicação destes sistemas a condições de serviço mais extremas. Também a humidade relativa ambiente e o teor de água do substrato poderão ser condicionantes. Por exemplo, o NCHRP Report 514, 2004, apenas permite a aplicação das resinas quando a humidade relativa do ambiente é inferior a 80 % e quando a quantidade de água no substrato é inferior a 10%.

Após a mistura dos componentes da resina, estes começam de imediato a reagir entre si iniciando-se o processo de polimerização. Esse processo deverá desenvolver-se tanto mais possível em contacto com os elementos com os quais a resina deverá ficar solidarizada. Existe portanto um período de tempo limitado para a sua aplicação após a mistura. Este período de tempo é denominado de tempo de utilização (*pot life*) e é imperativo que seja sempre respeitado. O valor corrente deste período oscila, consoante a temperatura e a formulação da resina, entre 30 e 60 minutos. O tempo de junção dos elementos a ligar, após aplicação da resina nas suas superfícies, é também pelos mesmos motivos, limitado. Este é designado por tempo de contacto (*open time*) e normalmente ronda os 30 minutos.

Após a aplicação, o tempo de cura das resinas varia naturalmente com a formulação da resina mas também e em larga escala com a temperatura ambiente. No entanto, de uma forma geral, impõe-se um mínimo de 24 horas até que se possa considerar que a resina desenvolveu as propriedades previstas.

É importante que todos os Produtos constituintes dos Sistemas Compósitos de FRP sejam compatíveis entre si, sobretudo em termos de aderência, é por isso recomendado que se utilizem produtos do mesmo fabricante em cada aplicação.

### 3.2.2 Características Específicas

Apresentam-se agora as propriedades específicas de cada produto presente nos sistemas compósitos de FRP. Ou seja, indicam-se as características de desempenho do primário, da argamassa de regularização e do adesivo/resina de impregnação que são consideradas como relevantes para a função a que cada um destes produtos se destina. Os requisitos, ou valores mínimos a cumprir, para cada característica de desempenho é muitas vezes aqui omissa ou por depender especificamente de cada formulação de cada fabricante ou por não ser possível ainda balizar qual o seu valor limite.

O controlo dessas características de desempenho reveste-se de particular importância pelo facto de estes materiais serem os agentes com maior responsabilidade na eficiência da técnica de reforço por colagem exterior.

É determinante que se tenha presente que estas características de desempenho, quer sejam físicas, químicas ou mecânicas, devem ser exigidas ao fornecedor. Ou seja, todos os materiais deverão ser acompanhados pelas suas fichas técnicas onde se poderão verificar e comprovar todas as características de desempenho.

Nesse sentido importa também que estas sejam devidamente certificadas por um agente de avaliação da conformidade de competência técnica reconhecida pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC).

Alude-se também já aqui que, como as resinas são processadas (misturadas) em obra é necessário prever um controlo de qualidade efectivo para que se possa certificar que o seu manuseamento foi adequado e que o produto final corresponde ao previsto. Este controlo de qualidade, a par do controlo de toda a aplicação, é o objecto do Capítulo 5.

### 3.2.2.1 Primário

O primário é o primeiro produto, quando requerido pelo projectista ou recomendado pelo fabricante, dos constituintes dos sistemas compósitos de FRP a ser aplicado, a sua função é fundamentalmente de melhorar a resistência à tracção e as propriedades aderência do substrato de betão. Este apresenta uma viscosidade baixa que penetra na estrutura porosa do betão, selando-a.

As Tabela 3.1 e Tabela 3.2 apresentam as características de desempenho que o primário deverá exhibir.

Tabela 3.1 – Características de desempenho mecânicas do primário.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO	
a)	Resistência em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i	
b)	Módulo de elasticidade em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i	
c)	Extensão na rotura em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i	
d)	Resistência em compressão	EN 12190	s/i	
e)	Módulo de elasticidade em compressão	EN 13412	s/i	
f)	Resistência ao corte	EN 12188	s/i	
g)	Resistência ao arrancamento  Substrato de referência: C(0,70) segundo a EN 1766, cura durante 7 dias em atmosfera normal e envelhecimento de 7 dias a 70°C, por comparação com provete não impregnado	EN 1542	Aplicação/ Carga	Média (N/mm <sup>2</sup> ) (1)
			Vertical	≥ 0,8 (0,5) <sup>b</sup>
			Horizontal sem tráfego	≥ 1,0 (0,7) <sup>b</sup>
			Horizontal com tráfego	≥ 1,5 (1,5) <sup>b</sup>

(1) Valores EN 1504 (valor médio).

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.2 – Características de desempenho físicas do primário.

	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Temperatura de aplicação	-	s/i
b)	Tempo de utilização ( <i>pot life</i> )	EN 14022	s/i
c)	Tempo de contacto ( <i>open time</i> )	EN 12189	s/i
d)	Período de validade ( <i>shelf time</i> )	-	s/i
e)	Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614	s/i
f)	Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	s/i
g)	Viscosidade	ISO 3219	s/i
h)	Aptidão para aplicações e cura sobre condições ambientais especiais (2)	EN 12188 (NOTA: Pode ser necessário realizar o método de ensaio em condições ambientais diferentes das especificadas na EN 12188)	s/i
i)	Absorção capilar e permeabilidade à água	EN 1062-3	$w < 0,1 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0.5}$ (1)
j)	Profundidade de penetração medida em cubos de betão de 100 mm C(0,70) segundo a EN 1766. Após 28 dias de cura segundo a EN 1766, as amostras devem ser armazenadas segundo o processo de secagem da EN 1766.	A profundidade de penetração é medida com a exactidão de 0,5 mm partindo o provete e aspergindo a superfície de rotura com água, segundo a EN 14630. A profundidade da zona seca é considerada a profundidade efectiva de impregnação.	$\geq 5 \text{ mm}$ (1)

(1) Valores EN 1504

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

O primário por não se encontrar directamente exposto aos agentes ambientais não necessitará de cumprir requisitos específicos de durabilidade.

### 3.2.2.2 Argamassa de Regularização

O objectivo da argamassa de regularização é a de preencher pequenos vazios que possam existir no substrato, providenciando uma superfície suficientemente lisa para a aplicação do compósito de FRP. Esta também pode ser utilizada para nivelar superfícies ou para suavizar arestas até um raio admissível. Como tal a necessidade da sua aplicação depende do estado e das condições da superfície a destinada a receber a armadura de reforço.

Como já referido, a argamassa de regularização, muitas vezes, também é constituída por um terceiro componente a carga. Esta, segundo o fib Bulletin nº14, 2001, deverá ser um material não-condutor de

corrente eléctrica, com grande resistência à humidade e ser capaz de suportar temperaturas superiores a 120 °C sem se degradar e as suas partículas deverão ter uma dimensão máxima de 0.5 mm.

As Tabela 3.3 e Tabela 3.4 apresentam as características de desempenho que a *argamassa de regularização* deverá exibir.

Tabela 3.3 – Características de desempenho mecânicas da argamassa de regularização.

	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Resistência em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
b)	Módulo de elasticidade em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
c)	Extensão na rotura em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
d)	Resistência em compressão	EN 12190	≥ 45 MPa (1)
e)	Módulo de elasticidade em compressão	EN 13412	≥ 20 GPa (1)
f)	Módulo de elasticidade em flexão	EN ISO 178	s/i
g)	Resistência ao corte	EN 12188	s/i
h)	Aderência	EN 12188	s/i

(1) Valores EN 1504

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.4 – Características de desempenho físicas da argamassa de regularização.

	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Temperatura de aplicação	-	s/i
b)	Tempo de utilização ( <i>pot life</i> )	EN 14022	s/i
c)	Tempo de contacto ( <i>open time</i> )	EN 12189	s/i
d)	Período de validade <i>shelf time</i>	-	s/i
e)	Temperatura de transição vítrea (T <sub>g</sub> )	EN 12614	s/i
f)	Retracção/expansão impedidas	EN 12617 - 4	≥ 2,0 MPa (1)
g)	Coefficiente de dilatação térmica	EN 1770	s/i
h)	Aptidão para aplicações e cura sobre condições ambientais especiais (2)	EN 12188 (NOTA: o método de ensaio poderá precisar de ser executado sobre condições ambiente diferentes daquelas especificadas na EN 12188)	s/i
i)	Absorção capilar (2)	EN 13057	<0.5 kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0.5</sup> (1)

(1) Valores EN 1504

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Pela mesma razão que o primário, a argamassa de regularização, por não se encontrar directamente exposto aos agentes ambientais, não necessitará em princípio de cumprir requisitos específicos de durabilidade, no entanto, por poder ser aplicada em camadas com uma espessura considerável, ficando com a área das suas faces laterais expostas, poderá ser importante controlar a sua durabilidade.

### 3.2.2.3 Adesivo e Resina de Impregnação

A função tanto do adesivo como da resina de impregnação é a transmissão dos esforços entre o substrato de betão e a nova armadura e, no caso de aplicações com mais que uma camada, ainda a transmissão de esforços entre camadas. A resina de impregnação tem também a função de impregnar completamente as mantas/tecidos.

As características de desempenho requeridas a estes dois produtos são idênticas. No entanto, os requisitos podem diferir nas propriedades físicas devido da necessidade de menor viscosidade da resina de impregnação para o processo de impregnação.

As Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8 apresentam as características de desempenho que o adesivo/resina de impregnação deverá exibir.

Tabela 3.6 – Características de desempenho mecânicas do adesivo/resina de impregnação.

	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Resistência em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
b)	Módulo de elasticidade em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
c)	Extensão na rotura em tracção	ISO 527 / ASTM D 638	s/i
d)	Resistência em compressão	EN 12190	s/i
e)	Módulo de elasticidade em compressão	EN 13412	$\geq 2$ GPa (1)
f)	Módulo de elasticidade em flexão	EN ISO 178	$\geq 2$ GPa (1) $\geq 2$ GPa e $<15$ GPa (3)
g)	Resistência ao corte	EN 12188	$\geq 12$ MPa (1)
h)	Aderência	EN 12188 / EN 1542	$\geq 14$ MPa (1)
i)	Fadiga (2)	EN 13894-2	s/i
j)	Fluência (2)	EN 13584-1	s/i

(1) Valores EN 1504

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

(3) Valores fib Bulletin nº14 (2001)

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).



Tabela 3.7 – Características de desempenho físicas do adesivo.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO	
a)	Temperatura de aplicação	-		
b)	Tempo de utilização ( <i>pot life</i> )	EN 14022	≥ 40min. a 20 °C (3)	
c)	Tempo de contacto ( <i>open time</i> )	EN 12189	≥ 20 min. a 20 °C (3)	
d)	Período de validade <i>shelf time</i>	-	≥ 6 meses se 5°C < temperatura 25°C (3)	
e)	Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614	≥ 40 °C (1) ≥ 45 °C (3)	
f)	Retracção	EN 12617-1/EN 12617-3	<0,1 % (1)	
g)	Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	<100 x10 <sup>-6</sup> /°C (1)	
h)	Viscosidade (3)	ISO 3219	s/i	
i)	Aptidão para aplicações em superfícies verticais e intradorsos	EN 1799	O material não deve escoar mais de 1mm quando apertado sobre uma espessura de menos de 3mm (1)	
j)	Aptidão para aplicações em superfícies horizontais	EN 1799	A area do produto no fim do ensaio não deve ser inferior a 3 000mm2 (60mm de diâmetro) (1)	
k)	Aptidão para aplicação e cura sobre condições ambientais particulares (2)	EN 12188  (NOTA: o método de ensaio poderá precisar de ser executado sobre condições ambiente diferentes daquelas especificadas na EN 12188)	θ (°)	σ <sub>0</sub> (MPa)
			50°	>50
			60°	>60
			70°	>70
l)	Absorção de água (2)	EN 13580	<3% em peso (3)	

(1) Valores EN 1504

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

(3) Valores fib Bulletin n°14 (2001)

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.8 – Características de desempenho de durabilidade do adesivo.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Comportamento higrotérmico	EN 13733	Após exposição a ciclos térmicos ou a ambiente caracterizado por calor húmido a carga de corte por compressão de rotura dos provetes de betão endurecido não deve ser à tracção do betão (1)

Tabela 3.8 – Características de desempenho de durabilidade do adesivo. (cont.)

	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
b)	Ultra-violetas (2)	ISO 4892-3	s/i
c)	Ataque químico (2)	EN 13529	s/i

(1) Valores EN 1504

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

### 3.3 Laminados de FRP

Os denominados laminados de FRP são compósitos de FRP, pré-fabricados por um processo contínuo de pultrusão, com uma forma laminada ou seja com duas dimensões consideravelmente maiores que a terceira (espessura). Os laminados de FRP são constituídos por fibras contínuas, resina epoxídica ou de vinilester, *fillers* e, eventualmente, outros aditivos.

São os laminados de FRP que constituem a armadura que integra os sistemas pré-fabricados.

Existem laminados de FRP de diferentes larguras, usualmente a variar entre os 50mm e os 150 mm, e de diferentes espessuras, usualmente a variar entre os 1,2mm e os 1,4 mm, e ainda com diferentes teores de fibra. A própria fibra do laminado de FRP poderá ser de carbono, de aramida ou de vidro, sendo que, como já referido, no âmbito do reforço estrutural o carbono é o mais utilizado.

Os laminados de FRP são usualmente fornecidos em rolos com um diâmetro de cerca de 300 mm e também, a par das resinas, necessitam de ser armazenados adequadamente. De facto, é importante que fiquem armazenados em condições limpas, em um lugar fresco e seco, protegidos da luz solar directa e com níveis de temperaturas e humidade dentro do especificado pelo seu fabricante.

Alguns fabricantes fornecem os laminados de FRP com uma película de protecção sobre a superfície de contacto para que esta se mantenha limpa até ao momento da aplicação. Nos casos em que essa película não exista é recomendado que imediatamente antes da sua aplicação se utilize um solvente para a sua limpeza. Qualquer um destes procedimentos, remoção da película ou limpeza com um solvente, é fundamental para que se possa garantir a perfeita aderência entre o adesivo e o laminado de FRP.

Nas Tabelas 3.9, 3.10 e 3.11 identificam-se quais as características geométricas e de desempenho a exigir ao laminado de FRP. Também neste caso, a sua correcta definição e a exigência do seu cumprimento são indispensáveis para uma construção credível de um reforço com estes sistemas. Nesse sentido é fundamental que o fornecedor certifique os seus produtos por um agente de avaliação da conformidade de competência técnica reconhecida pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC).

Tabela 3.9 – Características geométricas do laminado de FRP.

CARACTERÍSTICA		DIMENSÃO
a)	Largura (mm)	50 – 150
b)	Espessura (mm)	1,2 – 1,4
c)	Cor	Uniforme e análoga à descrita na Ficha Técnica do fabricante

Tabela 3.10 – Características de desempenho mecânicas do laminado de FRP.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Resistência em tracção longitudinal (1), (3)	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
b)	Módulo de elasticidade em tracção longitudinal (1), (3), (4)	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
c)	Extensão na rotura em tracção longitudinal (1), (3), (4)	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i
d)	Fluência (2)	ISO 899-1 (3)	s/i

(1) Proposto por fib Bulletin nº14 (2001)

(2) Propriedades requeridas apenas em casos especiais.

(3) Proposto por CNT-DT 200 (2005).

(4) Proposto por MM6 (2005).

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.11 – Características de desempenho físicas do laminado de FRP.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Percentagem de fibras	ISO 14127	>60%
b)	Densidade	–	1,5 – 1,6
c)	Temperatura de transição vítrea	ISO 11357-2 / ASTM E 1640 (1)	>95 °C
d)	Coeficiente de dilatação térmica	ISO 11359-2 (2)	s/i

(1) Proposto por fib Bulletin nº14 (2001) e por CNT-DT 200 (2005).

(2) Proposto por MM6 (2005).

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

### 3.4 Mantas/Tecidos

As mantas/tecidos são a armadura dos sistemas curados *“in situ”*. Mais uma vez, são as fibras de carbono aquelas que mais usualmente se utilizam para constituir as mantas/tecidos destinadas ao reforço estrutural. As fibras utilizadas neste âmbito são invariavelmente contínuas e apresentam-se no estado seco ou pré-impregnado, sendo esta pré-impregnação uma forma de manter as fibras alinhadas até o momento da sua aplicação.

Como já ilustrado no capítulo anterior, as mantas são conjuntos de fibras alinhadas apenas na direcção de desenvolvimento da mesma e os tecidos são também constituídos por conjuntos de fibras mas em mais que uma direcção. Com efeito, os tecidos podem apresentar, com a sua direcção de desenvolvimento, fibras a 0° e 90°, a 0° e 45°, 0°, 45° e -45°, etc.

Ao contrário dos laminados de FRP, as mantas e os tecidos não têm qualquer material a revestir as fibras, sendo que aqui o controlo da natureza das fibras pode ser feito visualmente. De facto, no caso de as fibras serem de carbono, a manta ou o tecido irão exibir cor preta, amarela no caso da aramida e branca no caso do vidro.

Para a manutenção das suas características as mantas e os tecidos também necessitam de ser armazenados em condições limpas, em lugar fresco e seco, mantendo-se as temperaturas e níveis de humidade dentro do especificado, devendo ainda ficar protegidos da luz solar directa. Também algumas mantas/tecidos são fornecidas com uma película de protecção para assegurar uma superfície limpa no momento da aplicação.

Nas Tabelas 3.12, 3.13 e 3.14 identificam-se quais as características geométricas e de desempenho a exigir à manta/tecido. A sua correcta definição e a exigência do seu cumprimento são indispensáveis para uma construção credível de um reforço com estes sistemas. Nesse sentido, e mais uma vez, é fundamental que o fornecedor certifique os seus produtos por um agente de avaliação da conformidade de competência técnica reconhecida pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC).

Tabela 3.12 – Características geométricas da manta/tecido (fibra seca).

PROPRIEDADE	DIMENSÃO
a) Largura (mm)	100 – 400
b) Peso na direcção principal - 0° (g/m <sup>2</sup> )	200 – 600
c) Tipo de fibra/cor	Carbono/preta, Vidro/branca, Aramida/ amarela
d) Peso na direcção não principal - 90° (ou outra) (g/m <sup>2</sup> ) (1)	s/i
e) Orientação da fibra (1)	s/i

(1) Apenas para tecidos

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.13 – Características de desempenho mecânicas da manta/tecido (fibra+resina).

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Resistência em tracção - 0°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
b)	Módulo de elasticidade em tracção - 0°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
c)	Extensão na rotura em tracção - 0°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i
d)	Resistência em tracção na direcção transversal - 90°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
e)	Módulo de elasticidade em tracção na direcção transversal (Na origem) - 90°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i (Deverá ser indicada qual o valor da espessura considerada)
f)	Extensão na rotura em tracção na direcção transversal - 90°	EN ISO 527 -5 / ASTM D3039/D3039M	s/i
g)	Fluência (1)	s/i	s/i

(1) Propriedade requerida apenas em casos especiais.

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Tabela 3.14 – Características de desempenho físicas da manta/tecido (fibra seca).

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO		MÉTODO DE ENSAIO	REQUISITO
a)	Densidade da fibra	ISO 10119	s/i
b)	Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	s/i
c)	Quantidade de resina necessária para a impregnação	s/i	s/i

(1) Propriedade requerida apenas em casos especiais.

s/i – sem informação específica (ver especificações do fornecedor).

Depois de aplicada a manta/tecido já polimerizada com a resina torna-se num compósito de FRP, com o seu comportamento característico. No entanto, como este compósito de FRP é “fabricado” em obra, em circunstâncias que não permitem certificar a qualidade do produto final, é necessário um controlo de qualidade que afira as suas propriedades para que se certifique de que este exhibe as características previstas. Esse controlo de qualidade é abordado no Capítulo 5.

### 3.5 Comportamento a Longo Prazo

Importa, em termos de comportamento a longo prazo saber, não só saber como se comportam os materiais constituintes dos sistemas compósitos de FRP isoladamente, como também qual a evolução do seu desempenho ao longo do tempo após a sua aplicação, em conjunto com o substrato de betão.

De facto, embora o comportamento a longo prazo, tanto do compósito de FRP como do betão, esteja bem documentado, o desempenho ao longo do tempo da combinação destes dois materiais reveste-se de incertezas, reflexo de estes sistemas de reforço serem relativamente recentes e devido à falta de investigação consistente e devidamente documentada. No entanto, os estudos levados a cabo fornecem razões para acreditar que, correctamente dimensionados e aplicados, os sistemas compósitos de FRP oferecem um maior ciclo de vida e custos inferiores de manutenção quando comparados com outros sistemas de reforço (fib Bulletin nº14, 2001; CERF, 2001; MM6, 2005).

#### 3.5.1 Durabilidade

A durabilidade dos materiais pode ser afectada por vários factores ambientais. Com efeito, a temperatura, a humidade, a radiação ultra-violeta e a agressão ambiental química podem alterar o seu desempenho e o seu período de vida. Nesse sentido importa saber que influência têm estes factores sobre os sistemas compósitos de FRP.

##### ( i ) Temperatura

As resinas pertencentes aos sistemas compósitos de FRP são, como já referido, bastante sensíveis à temperatura. De facto, esta pode intervir tanto nas propriedades finais da resina como na sua durabilidade. De todas as implicações que esta possa ter, a mais crítica, como já enunciado no capítulo anterior, é sem dúvida o facto de a partir de determinados níveis de temperatura o seu estado passar de vítreo e frágil para um estado elástico e dúctil, originando um, potencialmente fatal, decréscimo acentuado das importantes propriedades mecânicas, designadamente a resistência e a rigidez.

Cada resina, dependentemente da sua formulação, apresenta uma potencial  $T_g$  própria. Esta pode ser atingida ou não, conforme o grau de cura da resina, que por sua vez, depende de todas as condicionantes como o ambiente durante a cura, o manuseamento, etc. Mesmo após a cura, e para a mesma resina, a  $T_g$  não é um valor estático, variando ao longo do tempo, com a alteração da humidade ambiente e em consequência da exposição a temperaturas elevadas. De facto, verifica-se que a absorção de humidade faz baixar a  $T_g$  (Figura 3.2) e que a sujeição a temperaturas elevadas pode originar uma pós cura que elevará a  $T_g$ .

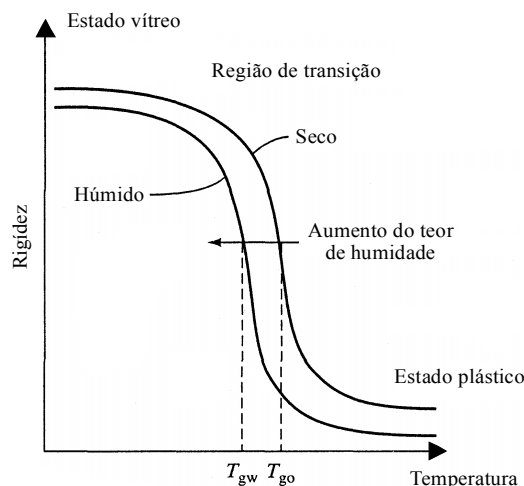


Figura 3.2 – Efeito higrotérmico no comportamento de um adesivo (ensaio DMTA) (Juvandes, 1999).

Mais uma vez se salienta ser fundamental o controlo da temperatura máxima a que a resina possa estar sujeita durante o período de serviço da estrutura. Ou seja, que a temperatura do substrato não ultrapasse a temperatura crítica do material ( $T_c$ ).

Por outro lado, as baixas temperaturas tornam os polímeros menos flexíveis, tornando-os mais susceptíveis à micro-fendilhação e, enquanto matriz do compósito de FRP, à degradação da ligação entre esta e a fibra. A tendência a danos por fadiga também aumenta, mas, geralmente, mantêm-se inalteráveis a resistência e rigidez do compósito.

Até este ponto foi abordada a implicação da temperatura na resina sem considerar qual o efeito de esta estar em contacto com o betão, ou seja, o efeito de eventuais coeficientes de dilatação térmico ( $\alpha$ ) distintos entre os meios. Assim, as resinas utilizadas nos sistemas compósitos de FRP, de formulação epoxídica, são as menos deformáveis quando sujeitas a variações de temperatura ( $\alpha_m = 40$  a  $60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), mas mesmo assim exibem uma deformação bastante superior à do betão ( $\alpha_c = 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Também os compósitos de FRP apresentam coeficientes de dilatação térmicos distintos do betão. Na direcção das fibras, exibem um valor próximo de zero e, na direcção transversal, igual a ( $\alpha_t = 30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Esta restrição da expansão térmica não parece, no entanto, afectar significativamente a ligação dos materiais, quando ocorrem pequenas oscilações da temperatura ( $\pm 28^{\circ}\text{C}$ ), podendo, contudo, propiciar alguns problemas de instabilidade nas fibras do compósito de FRP, devido ao surgimento de tensões internas de compressão (Juvandes, 1999).

## ( ii ) Humidade

Atendendo ao facto que a maioria dos sistemas compósitos de FRP utilizados em estruturas de betão armado vão estar em contacto com a humidade, por causas naturais ou por acidente, é essencial que as suas repercussões, tanto a curto como a longo prazo, sejam consideradas.

É facto que todas as formulações poliméricas são susceptíveis de absorver humidade por difusão e também é um facto que essa absorção implica alterações nas suas propriedades termofísicas, mecânicas e químicas. Em geral, a exposição e consequente absorção de humidade, resulta numa redução do valor da  $T_g$ , como já referido, e das suas propriedades mecânicas. Por exemplo, a  $T_g$  pode diminuir em 25% devido a uma concentração de humidade de 4% e a resistência à flexão ser reduzida para 50% devido a uma concentração de humidade de 1,5% (EUROCOMP, 1996). Tal como para a temperatura, o comportamento da resina, quando sujeita a este factor ambiental, é tanto melhor quanto a qualidade da sua cura.

Em alguns casos, a humidade absorvida pode acumular-se ao longo da interface fibra-matriz, podendo originar a perda da integridade dessa ligação (Karbhari et al., 2003). É assim importante, que a espessura de resina que envolve as fibras, tenha uma espessura suficientemente grande e que se mantenha não fendilhada de forma a impedir a chegada de humidade à referida interface. Contudo, existem formulações que apresentam uma maior resistência aos efeitos de humidade, e, sempre que se preveja uma elevada exposição, estas devem ser sempre escolhidas.

Uma outra consequência da humidade, neste caso, não relativa à alteração das propriedades da resina, mas sim à sua actuação sobre a interface de ligação do compósito de FRP à superfície de betão poderá ser o descolamento prematuro do compósito de FRP. De facto, o reforço com sistemas compósitos de FRP, sela o betão não permitindo a transferência de vapor de água, o que poderá originar a acumulação de água na referida interface causando uma pressão potencialmente perigosa (fib Bulletin nº14, 2001).

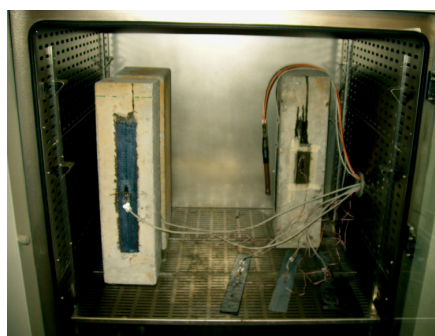
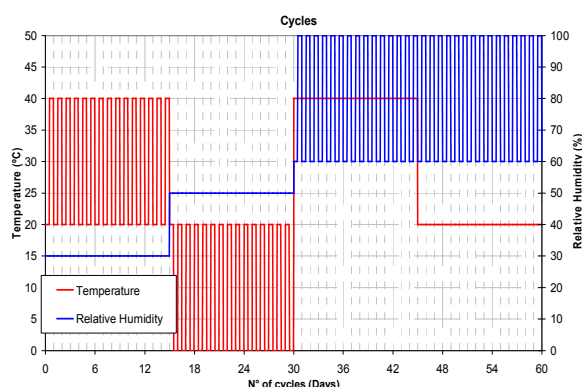


Figura 3.3 – Estudo do efeito higrotérmico no comportamento de um adesivo (Silva, 2007).

A Figura 3.3 ilustra um estudo realizado na FEUP com vista a interpretar o efeito de ciclos conjugados de temperatura e humidade em junta coladas de FRP a substratos de betão.

Assim, e principalmente nas aplicações de sistemas curados "*in situ*" que tendem a cobrir grande parte da superfície do elemento, para controlar a acumulação de água, devem ser previstos espaços suficientes entre compósitos de FRP aplicados para permitir a respiração do betão (Mack et al., 1999).



### ( iii ) Radiação ultra-violeta (UV)

A degradação da resina epoxídica pode resultar do facto de o comprimento de onda necessário para dissociar as ligações nos materiais poliméricos ser da mesma ordem de grandeza dos apresentados pela radiação UV do espectro da luz solar (Fonseca, 2005). Mas, os efeitos da exposição, ou fotodegradação da matriz, são usualmente confinados à camada mais superficial do material. No entanto, pode acontecer que ocorram efeitos, menos superficiais que na generalidade dos casos, que afectem as propriedades mecânicas. Resultado da concentração de tensões na zona degradada o que origina a micro fendilhação da matriz.

A fotodegradação da matriz do polímero conjugada com a presença de agentes ambientais, nomeadamente variações higrótérmicas ou mesmo ciclos de gelo-degelo, pode potenciar o ingresso de humidade e assim a exposição a outros agentes indesejáveis que afectam as propriedades mecânicas do compósito de FRP. Não se atribui, portanto, os efeitos secundários apenas à radiação UV, mas sim à conjugação desta com a humidade.

Uma outra consequência da exposição à radiação UV é a alteração da cor do compósito de FRP. Interessa esclarecer que, a tendência natural para se associar este fenómeno a um indicador de degradação das propriedades da resina, como por exemplo, a redução da sua resistência, não é de todo correcta, sendo que na realidade a opacidade da resina é apenas um estado da superfície e não um indício de qualquer alteração à sua integridade estrutural.



Figura 3.4 – Protecção à exposição solar de um reforço com CFRP e GFRP.

A protecção às radiações UV é facilmente conseguida, aplicando uma pintura de uma tinta acrílica clara ou de uma à base de poliuretano, como se processou no caso do reforço de elementos esculturais ilustrados na Figura 3.4 (Juvandes et al, 2003).

### ( iv ) Agressão química

Os ambientes alcalinos, ácidos ou solventes orgânicos podem constituir uma ameaça ao sistema compósito de FRP, sendo que o principal agente de oposição à corrosão é a própria resina do compósito de FRP, a

matriz, que envolve as fibras. De uma forma global, o epóxico e o vinilester, comumente utilizados, desempenham bem esse papel, salvaguardando que, as soluções alcalinas também podem atacar as próprias resinas e a sua ligação às fibras, principalmente se estas não estiverem completamente curadas.

Nos sistemas pré-fabricados, deve ainda atender-se à hipótese de ocorrência de situações designadas por “tensão de corrosão”, que se traduzem pela ruína catastrófica dum compósito de FRP a baixas tensões devido ao acesso directo da agressividade ambiental às fibras, por difusão ou por formação de mecanismos de fendilhação na matriz.

É assim importante, como controlo da potencial agressão química, que a resina tenha uma formulação ajustada às condições ambientais de serviço, que a sua espessura envolva as fibras, tenha uma dimensão suficiente e se mantenha não fendilhada, e que se seleccionem fibras com confirmada resistência química (como o carbono e o vidro-C) (CERF, 2001).

### 3.5.2 História de Carga

Neste ponto aborda-se o comportamento a longo prazo dos constituintes de um sistema compósito de FRP relacionando-o com a solicitação ao longo do tempo. São portanto os fenómenos de fluência, relaxação e fadiga que aqui são tratados.

#### ( i ) Fluência e relaxação

Os compósitos de FRP, devido às propriedades viscoelásticas do material, podem apresentar diferentes comportamentos em termos de fluência e relaxação quando sujeitos a acções constantes no tempo. Estas variações de deformação e de tensão num compósito de FRP são, fundamentalmente, dominadas por ocorrência de mecanismos de alteração na matriz, a nível das forças internas de ligação. A intensidade destes fenómenos depende de factores como o grau de cura da resina, o volume e a orientação das fibras, o processo de fabrico do compósito de FRP e, ainda, de agentes do meio, como a temperatura e a humidade. Neste contexto, as fibras de carbono, aramida e vidro têm um excelente comportamento.

Quanto maior for a  $T_g$  do compósito de FRP, menores são os seus fenómenos de fluência. Os compósitos de FRP reforçados unidireccionalmente apresentam melhor comportamento na direcção das fibras, do que os bidireccionais e os multidireccionais. O aumento de tensões de tracção, combinado com ambientes de elevada amplitude higrotérmica e agentes químicos agressivos, pode conduzir ao amolecimento da resina, à diminuição da ligação interlaminar e, por último, à antecipação no tempo da ruína por fluência (EUROCOMP, 1996). A Figura 3.5 ilustra o comportamento típico de um compósito de FRP à fluência. Para deformações baixas, a estrutura recupera o estado inicial, após a eliminação da carga. Em oposição, para tensões de tracção elevadas, a rotura pode surgir ao fim de um certo tempo, através da formação de mecanismos progressivos de ruína, por instabilidade da matriz e fendilhação laminar (pontual), até ao limite do esgotamento da capacidade da fibra (roturas sucessivas de grupos de fibras).

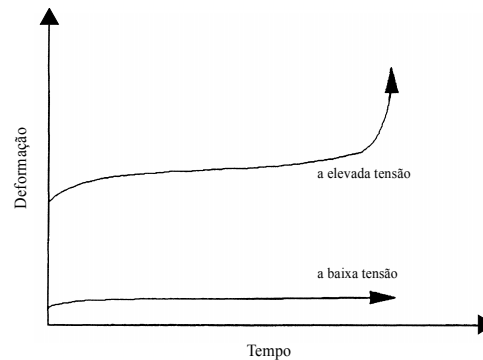


Figura 3.5 - Comportamento à Fluência de um compósito FRP (EUROCOMP, 1996).

Num projecto, é fundamental definir critérios de correcção e limitação de determinados parâmetros, afectos à fluência e à relaxação dos materiais, de modo a traduzirem a deformação e a tensão esperadas no compósito, ao longo do tempo. Como exemplo, para os primeiros salienta-se a redução do módulo de elasticidade e da resistência à tracção e, para os segundos, menciona-se a limitação da deformação e da tensão aplicada e o controlo da temperatura ambiente.

Visto que, na área dos novos materiais cada situação é um caso a analisar, estes critérios devem resultar da avaliação da informação experimental sobre casos específicos, disponíveis até hoje. Neste âmbito, a base de dados é reduzida e dispersa, mas no entanto, alguns trabalhos experimentais deverão servir de referência. Quando for necessário um estudo mais detalhado neste tema, o documento do CNR-DT 200, 2005 propõe a realização de ensaios de acordo com a norma ISO 899-1, 2003 ou ASTM D2990-0, 2001.

## ( ii ) Fadiga

O tipo de solicitação, estática, dinâmica ou cíclica, pode intervir nas propriedades a longo prazo dos compósitos de FRP.

Constata-se que a generalidade dos compósitos de FRP com fibras de elevado desempenho (carbono e aramida), quando submetidos a acções cíclicas, apresentam uma melhor resistência à fadiga do que os equivalentes em aço. Quando o reforço é executado com fibras de vidro, estes produtos comportam-se pior do que os anteriores, havendo uma redução significativa de resistência a baixos níveis de tensão. A ruína por fadiga de um compósito de FRP é progressiva, ao contrário do aço, cuja ruína surge rápida.

A resistência à fadiga de um compósito de FRP é bastante boa quando as solicitações actuam na direcção das fibras, mas insuficientes para carregamentos transversais ou de corte. Na ausência de modelos matemáticos de caracterização destas propriedades, a sua obtenção é, normalmente, determinada por via experimental, definindo-se curvas de relação tensão-ciclos de carga ( $\sigma$ -N). Depois, para consideração em

projecto, limitam-se das tensões ou das deformações por fadiga abaixo dos valores estabelecidos nessas curvas (EUROCOMP, 1996).

Entretanto, ainda são diminutas as informações sobre o comportamento à fadiga de compósitos de FRP aplicados sobre betão para o seu reforço. Contudo, os resultados de vários estudos indicam que a resistência à fadiga das estruturas reforçadas aumenta. Sublinha-se assim o facto de os compósitos de FRP expressarem mais insensibilidade do que os equivalentes em aço à denominada “corrosão por fricção”, como consequência do efeito cíclico e do estado de fendilhação que vai surgindo na estrutura (Juvandes, 1999). Portanto não será a resistência à fadiga do compósito de FRP o factor decisivo num reforço, mas sim, o comportamento da estrutura de betão armado ou pré-esforçado, recomendando-se para projecto a limitação do nível de tensão no aço para valores idênticos ao permitido para estruturas não reforçadas (fib Bulletin nº14, 2001).

Quando um projecto de reforço sugere a necessidade de um estudo mais detalhado nesta matéria, o documento do CNR-DT 200, 2005 propõe a realização de ensaios de acordo com a norma ISO 13003, 2003 ou ASTM D3479/D3479M-96, 2007.

### 3.6 Comportamento ao Fogo

O comportamento ao fogo pode tornar-se num ponto crítico no reforço de estruturas com sistemas compósitos de FRP. De forma que, até à data, o reforço com estes sistemas tem sido predominantemente utilizado em estruturas em que, ou a resistência ao fogo não é tipicamente considerada como crítica (incluindo-se as situações com protecção adequada) ou então em estruturas capazes de funcionar sem o reforço durante a eventualidade de um incêndio (ACI 440.1R-06, 2006).

A maioria dos compósitos de FRP pultrudidos não é directamente inflamável e apresenta um comportamento satisfatório a elevadas temperaturas, no entanto, a sua ligação ao elemento estrutural é feita por intermédio do adesivo, curado à temperatura ambiente, que por sua vez é bastante sensível a altas temperaturas.

Sob o ponto de vista das propriedades mecânicas do reforço, o efeito da temperatura e o seu tempo de permanência constituem factores deveras preocupantes. As consequências da elevação da temperatura no adesivo ou na resina de impregnação estão directamente ligadas com o valor do  $T_g$  e traduzem-se na perda de propriedades como já referido anteriormente.

Existe também preocupação relativamente ao desenvolvimento de chamas, desenvolvimento de fumos e toxicidade. Estes são comumente associados à combustão de polímeros com resinas termoendurecíveis, como é o caso da resina epoxídica. De facto, segundo Sorathia et al. (citado no documento ACI 440.1R-06, 2006) as resinas termoendurecíveis geram níveis inaceitáveis de fumo durante a sua combustão embora tenham relativamente pouca capacidade para desenvolver chamas. Quanto à sua toxidade a combustão

destes materiais gera uma variedade de gases potencialmente perigosos como é o monóxido de carbono, ácidos fluorídrico, clorídrico, sulfídrico e cianídrico. Contudo, estão a ser desenvolvidos aditivos e cargas que conseguem intervir na componente química das resinas a nível da reacção de combustão, removendo calor, reduzindo a concentração de gases combustíveis e inibindo o fluxo de oxigénio para o local onde se está a desenvolver a queima (Fonseca, 2005).

Em termos de construção civil, o reforço com os sistemas compósitos de FRP pode executar-se, como referido no capítulo anterior, segundo a técnica EBR ou a técnica NSM. Relativamente ao comportamento ao fogo, o reforço com compósitos de FRP inseridos em elementos de betão (técnica de NSM), a estrutura tem um comportamento de risco reduzido, semelhante ao exigido para as estruturas de betão armado e pré-esforçado em situações de incêndio. Para isso, é conveniente estudar a espessura de recobrimento do compósito de FRP utilizado no reforço, assim como a matriz constituinte do compósito, para se garantir o tempo de resistência ao fogo estabelecido no projecto (ACI 440.1R-96, 1996).

No caso de reforço por colagem exterior (técnica de EBR) com exposição directa dos sistemas compósitos às acções do fogo, como por exemplo as colagens exteriores de laminados de FRP ou de mantas/tecidos, o reforço estrutural pode ficar comprometido. Nestes casos, o comportamento ao fogo do sistema deve ser analisado segundo três níveis, ou seja, o efeito das elevadas temperaturas próximas ou superiores à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o efeito da combustibilidade dos materiais e o efeito da toxicidade e desenvolvimento de fumos, estes últimos sobretudo no caso de aplicações no interior das construções.

Normalmente, a literatura internacional (Bisby et al., 2005) recomenda que, nos casos de exposição directa ao fogo, não se deva executar reforços com sistemas compósitos de FRP, a menos que se apliquem procedimentos adicionais de protecção. Em qualquer dos casos, a resistência ao fogo dos elementos reforçados deve ser avaliada tendo presente as exigências regulamentares em vigor (Regulamento de Segurança contra Incêndios e o Eurocódigo EC2, Parte 2-2), as especificidades do projecto e as informações técnicas dos produtores dos sistemas compósitos de FRP.

### 3.7 Considerações Finais

Os elementos constantes neste capítulo constituem uma base para o projectista do reforço redigir as condições técnicas especiais dos materiais para inclusão do caderno de encargos. Também sensibilizará os intervenientes em obra (aplicadores e fiscalização) para as propriedades e cuidados de manuseamento a ter com os constituintes do sistema.

Do desenvolvimento deste capítulo destacaram-se os seguintes aspectos:

- Foram identificadas e reunidas as principais propriedades dos materiais constituintes de um sistemas de FRP, segundo as orientações indicadas nas EN 1504, com vista a clarificar quais

dessas são importantes para projecto, para as informações a incluir nas fichas técnicas e para medidas de controlo em obra.

- Para além da identificação das principais propriedades foi também importante o estabelecimento das normas que regem a sua avaliação e controlo;
- Foi possível organizar de forma sistematizada para caderno de encargos as especificações dos materiais relativos as sistemas pré-fabricados e os específicos de sistemas curados *"in situ"*;
- A necessidade de um manuseamento da resina epoxídica tanto em relação ao seu armazenamento durante o tempo que precede a sua aplicação como em relação a todo o seu processo de aplicação;
- O cumprimento de todos os cuidados com a mistura dos componentes, o respeito das condições higrotérmicas, etc. vai ter uma repercussão directa tanto nas propriedades das resinas tanto a curto prazo como a longo prazo;
- As resinas epoxídicas apresentam uma temperatura crítica a partir da qual já não se pode considerar que a resina esteja apta a cumprir com os seus requisitos e que essa temperatura pode ser "facilmente" atingida quando sujeitas à exposição ambiental;
- Os compósitos de FRP possuem um bom comportamento a longo prazo e uma boa resistência à agressão ambiental;
- A possibilidade da acção fogo deverá ser devidamente ponderada visto que esta inviabiliza rapidamente o reforço;
- A importância que a protecção do sistema compósito de FRP constitui, apresentando vantagens nas propriedades a longo prazo, na manutenção dos gradientes térmicos devidos à exposição ambiental das resinas e na sua obrigatoriedade sempre que a acção fogo seja uma possibilidade.

## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO

Neste capítulo abordam-se os procedimentos de construção de um reforço de estruturas de betão armado com sistemas compósitos de FRP, através da técnica de colagem exterior de designação internacional *“Externally Bonded Reinforcement”* (sigla EBR) (fib Bulletin nº14, 2001; ACI 440.2R-02, 2002; CNR-DT 200, 2005). Pretende-se aqui, para além da enumeração e descrição de todos os passos a seguir para a correcta execução do reforço, comentar e alertar para, eventuais dificuldades ou tarefas que exijam cuidados especiais, objectivando o bom desempenho do sistema tanto a curto como a longo prazo.

Pretende-se cobrir todas as etapas do processo de reforço, incluindo-se, para além da execução propriamente dita, a análise prévia do projecto e o controlo dos materiais e da mão-de-obra interveniente, assim como, após a conclusão do mesmo, a reparação de não conformidades decorrentes de eventuais falhas na aplicação e a protecção do sistema.

As principais etapas de execução do reforço e a sua interligação cronológica estão esquematicamente representadas no organograma ilustrado na Figura 4.1. Nele, apresentam-se as oito etapas que decorrem sempre em qualquer operação de reforço (conexões a traço contínuo - obrigatórias) e as duas que apenas ocorrerão em certos casos (conexões a tracejado - condicionadas). A etapa de inspecção ao sistema aplicado está representada no organograma, mas será, no entanto, objecto de exposição detalhada no Capítulo 5, dedicado ao controlo de qualidade.

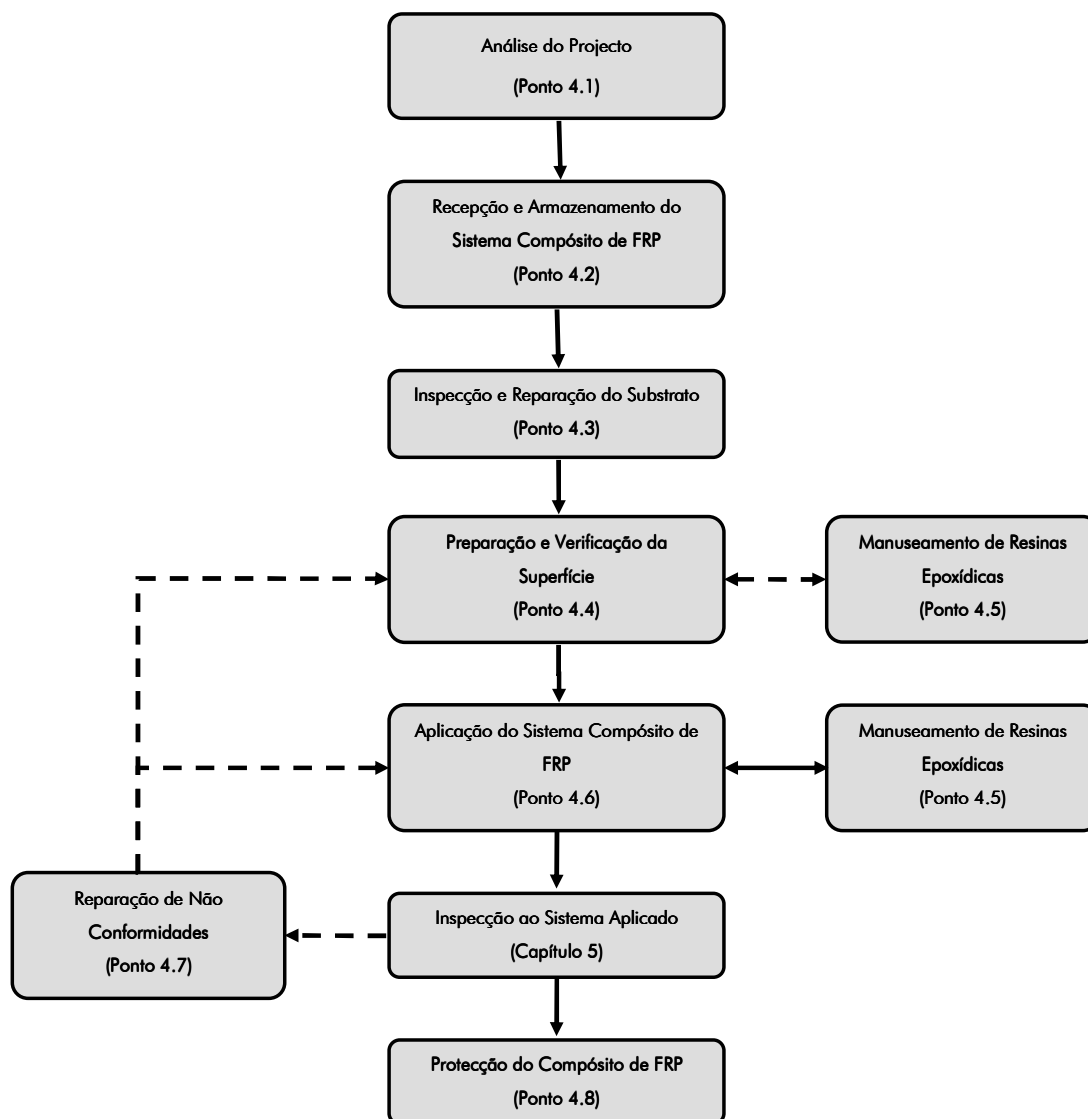


Figura 4.1 – Organograma das etapas do processo de reforço, pela técnica EBR.

## 4.1 Análise do Projecto

O processo de construção de um reforço começa com a análise do projecto de reforço. É fundamental que este seja profundamente analisado pelos responsáveis da sua execução antes do início da intervenção em obra. Essa análise deverá identificar todos os eventuais erros, omissões, indefinições ou inconsistências que o projecto possa ter, que deverão ser totalmente esclarecidos antes do início da operação de reforço. É também importante ter consciência da ordem das tolerâncias permitidas pelo projectista, verificar a possibilidade do seu cumprimento e, se necessário, ajustar os procedimentos de modo a respeitá-las. No final desta análise já deverá existir uma clara compreensão de quais os ensaios de controlo de qualidade a realizar e quais os resultados a atingir.



O projecto também deverá ser confrontado com as condicionantes do local e as limitações do construtor. Será portanto necessário perceber as limitações ou restrições inerentes à envolvente física da obra e verificar-se a compatibilidade entre o método de construção proposto pelo projectista e os meios disponibilizados pelo construtor ao qual a obra foi adjudicada. Como o reforço aplicado necessitará de cumprir um controlo de qualidade e, eventualmente, de manutenção durante o seu período de serviço é aconselhável que se compatibilize a intervenção com a acessibilidade em funcionamento.

É recomendado que na análise das condições técnicas especiais do projecto, para os materiais a empregar em obra, se tenha um cuidado adicional na interpretação de especificações do género, “do tipo”, “equivalente a”, etc., que pela sua ambiguidade e falta de objectividade, devem ser evitadas.

Também a segurança dos trabalhadores na execução dos trabalhos e eventuais impactes ambientais que possam decorrer da operação do reforço deverá ser analisada e discutida antes do início dos trabalhos. A solução deverá passar, obviamente, pelo cumprimento de todos os regulamentos vigentes relativos, tanto às questões de segurança no trabalho como às de gestão ambiental.

## 4.2 Recepção e Armazenamento

Neste ponto indicam-se os procedimentos e as precauções a ter com os constituintes dos sistemas compósitos de FRP a partir do momento que eles são recepcionados e armazenados em obra.

### ( i ) Recepção do material

Na sua recepção, o material deverá ser conferido para se observar se este se encontra de acordo com a nota de encomenda, controlando-se as designações dos produtos e as respectivas quantidades. Deverá também ser sujeito a uma inspecção visual, no sentido de se aferir qual o seu estado e de serem despistadas eventuais não conformidades devidas, por exemplo, a um transporte inadequado.

De facto, as embalagens que contêm os componentes das resinas deverão apresentar-se invioladas e verificar-se se estas se encontram dentro do seu *shelf time*.

No caso de um sistema pré-fabricado, qualquer paminado de FRP que exiba fissuras, delaminações ou que de alguma forma esteja danificado, como ilustrado na Figura 4.2, deverá ser rejeitado.



Figura 4.2 – Laminado de FRP danificado (Kaiser et al., 2001).

No caso de um sistema curado *"in situ"*, qualquer manta/tecido que se apresente com as fibras partidas, desalinhadas, vincadas ou com qualquer outra alteração ao seu estado original, como exemplificado na Figura 4.3, deverá ser rejeitada. Neste sistema ainda se deverá verificar se a cor da fibra está de acordo com a natureza do material, ou seja, ser de cor preta se se tratar de fibra de carbono, amarela se se tratar de fibra de aramida e por fim branca se se tratar de fibra de vidro.

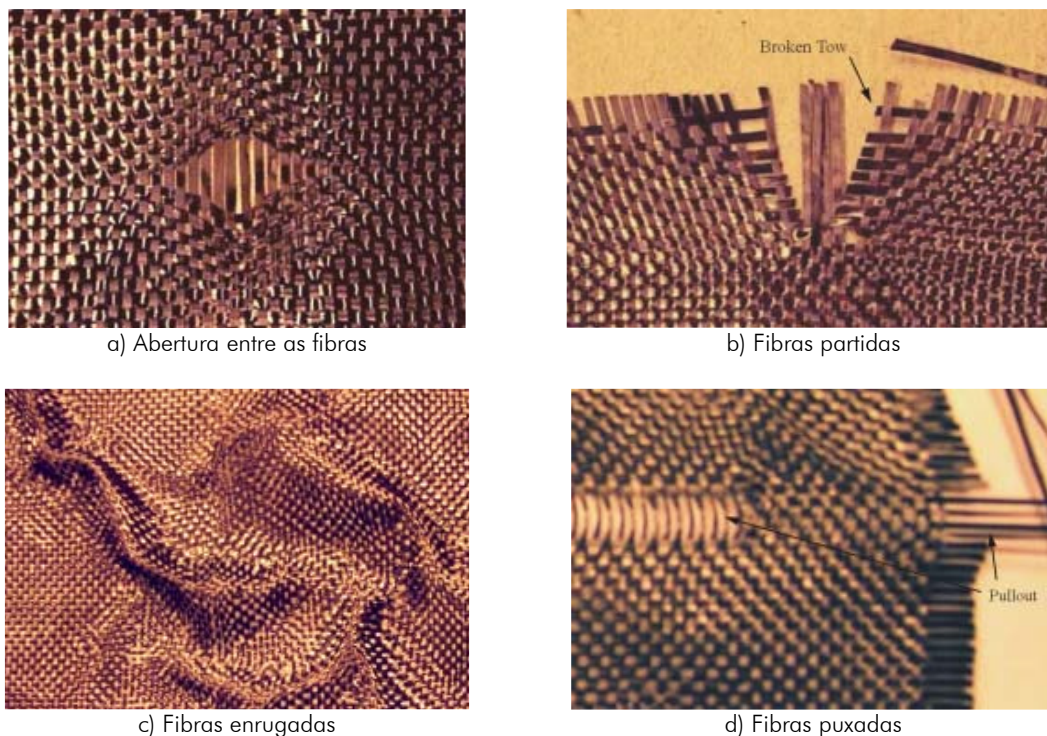


Figura 4.3 – Não conformidades em mantas/tecidos (Kaiser et al., 2001).

Deverá ainda ser verificado se todas os constituintes dos sistemas compósitos de FRP estão devidamente rotuladas, com a indicação da sua designação, data de validade e número de identificação do sistema, devendo também constar o nome e o contacto do fabricante.

## ( ii ) Documentação

É importante que os materiais sejam sempre acompanhados das suas fichas técnicas com toda a informação relevante sobre o produto. As fichas técnicas deverão apresentar toda a informação geral de identificação do produto como o nome, tipo e função do produto, quais os seus componentes, o nome e a morado do seu fabricante, o número do lote de produção e a data de validade. Deverão ainda apresentar quais as características de desempenho mecânicas, físicas e a durabilidade reclamada para o produto, assim como, toda a informação relativa ao manuseamento, transporte, armazenamento.

É fundamental que se apresentem também os comprovativos, emitidos por um laboratório independente devidamente certificado, de todas as Características de Desempenho reclamadas pelo fabricante. Não

possuindo o fabricante os referidos documentos poderá ser acordada uma realização de ensaios para que se ateste o cumprimento das especificações técnicas exigidas ao produto.

A informação constante nas fichas técnicas deve ser confrontada com as condições especiais técnicas discriminadas pelo projectista no caderno de encargos.

A informação relativa à segurança no trabalho e à gestão ambiental também deverá ser disponibilizada pelo fornecedor e mantida acessível, para consulta, no local de construção.

### **( iii ) Armazenamento**

É fundamental, para a manutenção das propriedades dos materiais constituintes do sistema compósito de FRP, que estes sejam devidamente armazenados durante o tempo que medeia a sua recepção e a sua aplicação, de acordo com o especificado pelo fabricante. Em linhas gerais, e como já enunciado no capítulo anterior, estes devem ser armazenados em condições limpas e mantidos nas suas embalagens originais, devidamente seladas. Devem estar protegidos de potenciais agressões físicas, da luz solar directa e de temperaturas e níveis de humidade fora do especificado nas suas fichas. Os componentes das resinas, resina e endurecedor, deverão ser armazenados separadamente. Qualquer material que tenha sido armazenado sem cumprir com as exigências supracitadas deverá ser eliminado.

As resinas, ao contrário das fibras, não têm uma validade ilimitada. Com efeito, o seu *shelf time* é relativamente curto, variando entre 6 meses e 2 anos. Assim, a validade deve ser verificada e contraposta com a data prevista para a aplicação, rejeitando-se, obviamente, aquelas cuja validade expire antes.

### **( iv ) Manuseamento**

Todos os constituintes dos sistema compósitos de FRP devem ser manuseados atendendo às recomendações do fabricante. É exigido um especial cuidado com as mantas/tecidos para se evitar danos como a quebra de fibras, desalinhamentos e enrugamentos. Após o seu corte nas dimensões previstas no projecto, estas devem ser empilhadas com separadores ou cuidadosamente enroladas num rolo com um raio não inferior a 300 mm.

Se alguma embalagem de resina não for gasta por completo deve-se procurar mantê-la aberta o menor tempo possível e, ao tornar a fechar, sela-la devidamente para não permitir a transmissão de ar para o interior da embalagem. Nessas condições, teoricamente, os produtos cumprem o seu período de *shelf time*. No entanto, salvaguarda-se que é sempre desejável que as embalagens sejam utilizadas por completo, tanto por questões relacionadas com o correcto doseamento como com perda de propriedades pela eventual exposição excessiva ao ambiente.

### 4.3 Inspeção e Reparação do Substrato

O substrato de betão é o responsável pela transferência dos esforços da estrutura para o sistema compósito de FRP, é portanto imprescindível, para o sucesso da operação de reforço, que este se encontre em bom estado de conservação e com as adequadas propriedades mecânicas. Assim, para se assegurar a viabilidades do reforço é necessário verificar o cumprimento de requisitos, tais como, a resistência à tracção do betão, a largura das fendas que o elemento a reforçar possa apresentar e a sua espessura do seu recobrimento. No incumprimento de algum destes requisitos, deverá proceder-se à normalização da situação através de reparações específicas.

A inspeção ao substrato deve, por norma, ser executada durante a fase de projecto, no sentido de serem aferidos os parâmetros base para o dimensionamento do reforço, optimizando-o, e também no sentido de se definir em projecto, se necessária, a intervenção de reparação do substrato.

No entanto, por vezes, a inspeção é remetida para a fase de obra, justificando-se a sua inclusão nos procedimentos de execução.

Para a aferição do cumprimento dos tais requisitos, o substrato deverá ser sujeito a vários ensaios, assim como, a uma cuidada inspeção visual. Os ensaios deverão ser realizados em zonas consideradas como representativas e em número suficiente, que variará com a complexidade e dimensão da obra.

Na eventualidade da execução de alguma reparação poderá ser necessário executar novamente os ensaios de avaliação do substrato para que se ateste o sucesso da reparação.

Apresentam-se de seguida um primeiro ponto dedicado à inspeção e avaliação a realizar ao substrato de betão e um segundo ponto dedicado à sua eventual reparação.

#### 4.3.1 Inspeção e Avaliação

##### ( i ) Resistência à tracção superficial do substrato

Como já referido, a resistência à tracção do substrato é fundamental para a transmissão de esforços entre a armadura de reforço e o elemento a reforçar. Segundo o NCHRP Report 514, 2004, salvo indicação em contrário no projecto, esta resistência deverá ser no mínimo de 1,5 MPa. Para a sua avaliação recorre-se comumente ao ensaio de *pull-off* (Figura 4.4), cujos procedimentos de execução deverão respeitar a norma EN 1542. Este ensaio será abordado com maior detalhe no Capítulo 5.



Figura 4.4 – Ensaio de *pull-off* (SIKA, 2003).

Se o resultado do ensaio revelar que o betão não apresenta a resistência requerida, e se existirem indícios de que apenas a camada superficial se encontra degradada (o que ocorre na generalidade das situações pois é esta que primeiro sofre com a agressividade do ambiente), pode-se proceder à sua remoção e subsequente reconstrução da secção com uma nova camada, ambos de acordo com o especificado no ponto seguinte.

#### ( ii ) Estado de corrosão das armaduras

Como se sabe, a corrosão das armaduras está associada a grandes forças expansivas no interior do betão, estas provocam tensões que levam à sua fissuração, diminuindo as forças de ligação da camada de recobrimento, podendo mesmo, originar a sua delaminação (Figura 4.5), inviabilizando o funcionamento do reforço que lhe seja adjacente.



Figura 4.5 – Destacamento do recobrimento devido à corrosão (SIKA, 2003).

Por este motivo, o sistema compósito de FRP não deverá ser aplicado se as armaduras no interior do elemento a reforçar estiverem corroídas ou se existir a possibilidade de virem a corroer, sendo nesses casos obrigatória a sua reparação e/ou protecção da armadura.

O fib Bulletin nº14, 2001, especifica que a avaliação do estado de corrosão da armadura deverá ser realizada através do estudo da profundidade de carbonatação e do nível de concentração de cloretos.

A profundidade de carbonatação máxima admissível deverá ser estipulada em projecto, esse valor é função da velocidade de carbonatação que, por sua vez, é função das características do betão em causa e do ambiente em que está inserido (Meira et al., 2006). Para a sua avaliação poderá recorrer-se de forma expedita à solução de fenolftaleína, que através da sua simples pulverização, sobre um furo feito no betão ou sobre um carote previamente extraído deste, se detecta a espessura da camada carbonatada (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Furação, limpeza e pulverização de fenolftaleína (Ferreira, et al.)

O fib Bulletin nº14, 2001 indica que um nível de concentração de cloretos superior a 0,3 % por peso de betão é considerado perigoso. A sua avaliação deverá ser realizada em laboratório a amostras de pó do betão recolhidas no local (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Recolha de amostras para a análise da concentração de cloretos (Ferreira, J. et al.).

Existem ainda outros ensaios destinados à avaliação do estado de corrosão da armadura dos quais aqui se destacam a medição do potencial eléctrico da armadura e a medição da resistividade eléctrica do betão.

A medição do potencial eléctrico da armadura consiste na medição do potencial electroquímico, ou seja, potencial eléctrico de um metal relativo a um eléctrodo de referência, medido sob condições de circuito



aberto. Este ensaio, segundo a norma ASTM C876, 1991, requer que se localize a armadura de reforço no interior do betão e que se execute um roço no recobrimento para a ligação de um eléctrodo à armadura. Com um multímetro de elevada impedância interna é medida a diferença de potencial relativamente a um outro eléctrodo, de referência, que será movido ao longo da área a estudar (Figura 4.8). As medidas de potencial informam sobre a probabilidade da corrosão da armadura. É de salientar que a medição do potencial eléctrico é afectado por factores como a espessura do betão de recobrimento ou a existência de uma camada superficial muito resistiva, como acontece quando o betão se encontra carbonatado.

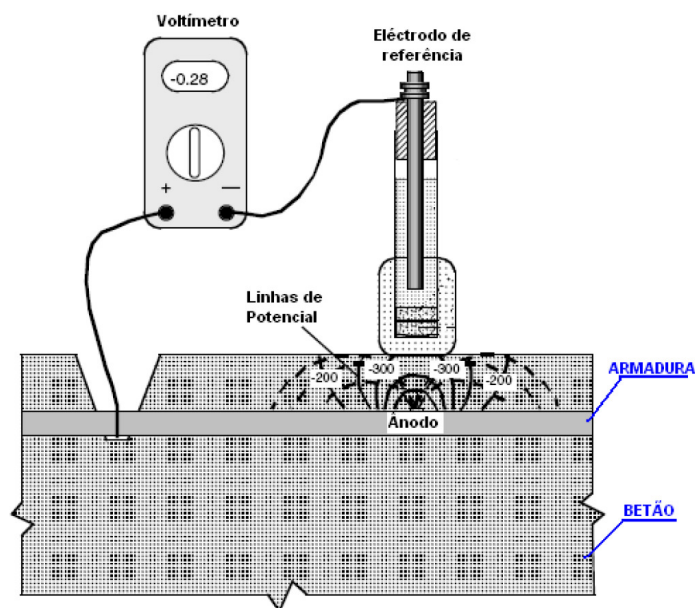


Figura 4.8 – Representação esquemática do ensaio de medição do potencial eléctrico das armaduras.

O método não destrutivo mais comum para a medição da resistividade eléctrica do betão é o método de Wenner. Este método consiste em colocar, sobre a zona a estudar, uma sonda constituída por quatro eléctrodos igualmente espaçados e aplicar uma corrente alternada entre os dois eléctrodos exteriores (Figura 4.9). Através da leitura dos valores da corrente alternada e diferença de potencial nos eléctrodos interiores é possível saber o risco de corrosão. Factores como a proximidade da armadura, a humidade, a temperatura e a carbonatação do betão podem influenciar de forma significativa o valor da resistividade e por isso deverão ser considerados na interpretação dos resultados. No sentido de minimizar a influência da armadura, a sua malha deverá ser localizada e a sonda, se possível, colocada entre esta. Todo o procedimento encontra-se descrito na recomendação RILEM TC 154-EMC.

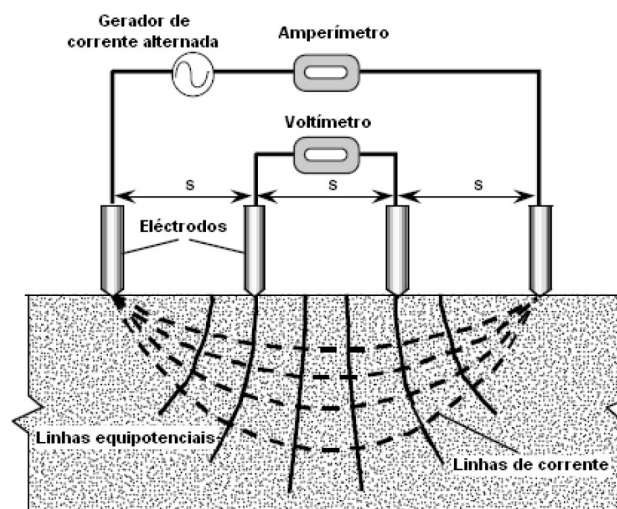


Figura 4.9 – Representação esquemática do ensaio de medição da resistividade – Método de Wenner.

Se os resultados dos ensaios indicarem a necessidade de intervenção, a zona afectada deverá ser reparada como indicado no ponto seguinte.

### ( iii ) Largura de fendas

A largura das fendas exibidas pelo betão tem uma grande influência no comportamento deste e da sua interacção com o reforço. A existência de fendas com uma largura excessiva, como visível na foto da Figura 4.10, pode antecipar a corrosão das armaduras, permitir a escorrência de água através do betão e comprometer o monolitismo do elemento, podendo ainda, devido ao seu movimento, provocar a delaminação do reforço. Nesse sentido o fib Bulletin nº14, 2001 limita a largura de fendas máxima admissível a 0,2 mm, ressalvando-se que, deverá ser considerado o disposto pelo projectista que a poderá limitar a outro valor, em consequência, por exemplo, da agressividade do meio. Como referência, poderá ser consultado o ACI 224.R, 2001 que estipula um critério para a definição da largura de fendas máximas admissíveis em função do ambiente.



Figura 4.10 – Elemento de betão armado fendilhado (SIKA, 2003).



A largura das fendas poderá ser avaliada recorrendo, por exemplo, a um óculo de fendas (Figura 4.11). Todas aquelas que exibam uma dimensão superior ao exigido, deverão ser preenchidas e seladas com a injeção sobre pressão de uma resina epoxídica de baixa viscosidade, como indicado no ponto seguinte.



Figura 4.11 – Medição de fendas com um óculo de fendas (Ferreira et al.).

#### ( iv ) Espessura de recobrimento

Também no sentido de se minimizar a possibilidade de corrosão é necessário que o elemento a reforçar exiba uma espessura do recobrimento mínima que proteja devidamente a armadura.

Assim, ao longo de todo o substrato destinado a receber o reforço, a espessura do recobrimento deverá ser sempre superior a 2,5 cm, podendo este valor, como no caso da largura de fendas, variar consoante a agressividade do meio, como referência, poderá ser consultado o ACI 224.R, 2001.

A espessura do recobrimento pode ser conhecida recorrendo-se a um sistema laser de detecção de armaduras (Figura 4.12). Nas zonas em que se verifique uma espessura inferior ao requerido, esta deve ser aumentada, através da adição de uma nova camada de argamassa de reparação, de acordo com o estipulado no ponto seguinte.



Figura 4.12 – Sistema laser de detecção de armadura.

### 4.3.2 Reparação do Substrato

#### ( i ) Remoção do betão deteriorado

A existência de porções do substrato de betão de alguma forma não conforme ou a detecção de armaduras corroídas a necessitar de tratamento ou substituição obriga à remoção de betão. Esse processo de remoção deverá ser de acordo com o ACI 546R-96, 1996 e ICRI No. 03730, 1995 e usando o equipamento apropriado como o martelo electropneumático.

A remoção deverá ser executada até uma profundidade de pelo menos 10 mm para além da espessura considerada como não conforme, permitindo assim, a exposição dos agregados que se encontram em boas condições. Devendo-se salvaguardar que se, no processo de remoção de betão, a armadura ficar exposta, se for danificada ou se perder a sua ligação com o betão, deverá remover-se uma profundidade nominal adicional de 20 mm para além da armadura em causa.

A Figura 4.13 mostra uma viga após a remoção de betão para a exposição da armadura corroída.



Figura 4.13 – Elemento com a armadura exposta (Karbhari et al., 2004).

#### ( ii ) Tratamento da corrosão ou armaduras danificadas

Como referido, o sistema compósito de FRP não deve ser aplicado num elemento em que se julgue existir armaduras corroídas, deterioradas ou danificadas de qualquer outra forma. Nesse caso e após a remoção do betão envolvente como indicado no item anterior, estas devem ser limpas e preparadas por abrasão até que a superfície se apresente livre de qualquer patologia e com a coloração típica do aço saudável. As armaduras danificadas, que necessitem de substituição, devem ser cortadas em comprimento suficiente para que se possa assegurar que toda a armadura remanescente se encontra com a secção completa e em perfeitas condições. É importante que a colocação de armaduras de substituição respeite os comprimentos de amarração. Todo o processo de reparação deve cumprir com os requisitos especificados na ICRI No. 03730, 1995.

Para o tratamento da corrosão, em estado inicial ou em situações em que mesmo não existindo corrosão se preveja o seu aparecimento, pode ser aplicado, sobre a superfície do betão, um inibidor de corrosão. Este consegue, de forma eficaz, reduzir a velocidade de corrosão ou mesmo interrompê-la. O inibidor de corrosão deve ser de eficácia comprovada de acordo com a ASTM G109.

A corrosão pode ainda ser tratada por outros métodos como as técnicas electroquímicas de protecção catódica (PC) e de realcalinização electroquímica (RE).

Estas técnicas permitem controlar a corrosão do aço quando a causa desta é a carbonatação do betão. Como vantagem, a utilização desta técnica não obriga à remoção de betão para além daquele que se encontra destacado, desde que o remanescente se encontre mecanicamente “são”. Tanto a PC como a RE correspondem a impor uma corrente entre o ânodo, colocado na face exterior da estrutura, e a armadura como ilustrado no esquema da Figura 4.14.

Na PC, esta corrente varia entre 5 e 20 mA/m<sup>2</sup> e terá que funcionar durante o período útil da estrutura, pelo que, é fundamental considerar a durabilidade da própria instalação e monitorizar regularmente os parâmetros electroquímicos, verificando a passagem de corrente suficiente para assegurar a protecção das armaduras.

No caso da RE, a corrente deve variar entre 1000 e 2000 mA/m<sup>2</sup> e distingue-se da anterior, por ser aplicada num período de tempo limitado a algumas semanas.

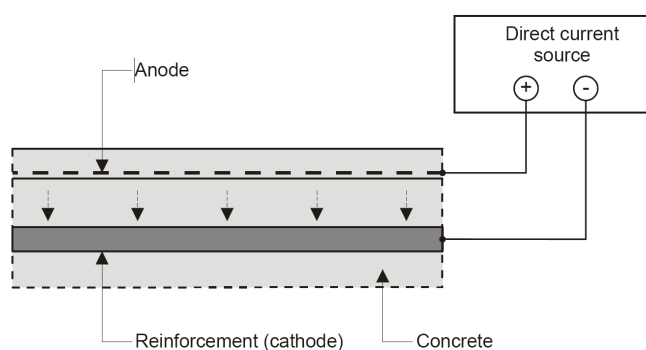


Figura 4.14 – Esquema representativo das técnicas electroquímicas (Bertolini et al., 2004).

### ( iii ) Reconstrução da secção de betão

Após a remoção de betão, por se encontrar não conforme ou para o tratamento de armadura corroída, ou pela necessidade de aumentar a espessura do recobrimento é necessário adicionar argamassa de reparação ao elemento a reforçar para reconstruir a secção com o perfil desejado (Figura 4.15).

Antes do início desse processo o substrato deve ser perfeitamente limpo e ficar isento de poeiras, leitadas, gorduras, óleos, produtos da cura, impregnações, partículas estranhas e quaisquer outros materiais inibidores da ligação e, se aplicável, a fonte da deterioração deverá ter sido identificada e tratada.

O material de reparação escolhido deve respeitar o disposto no ICRI No. 03733, 1997. Segundo o NCHRP Report 514, 2004 este deve ter uma resistência à compressão igual ou superior à do betão original e nunca inferior a 31 e 38 MPa, aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Imediatamente antes da sua aplicação deve ser empregue um agente de ligação de base epoxídica sobre o substrato e as armaduras expostas.

É importante que o material de reparação cure pelo menos durante 7 dias antes do início da aplicação do sistema compósito de FRP, a menos que a sua resistência seja comprovada.



Figura 4.15 – Reconstrução da secção (Karbhari et al., 2004).

Na Figura 4.16 apresentam-se as sucessivas fases do processo de reparação de um elemento com armaduras corroídas.

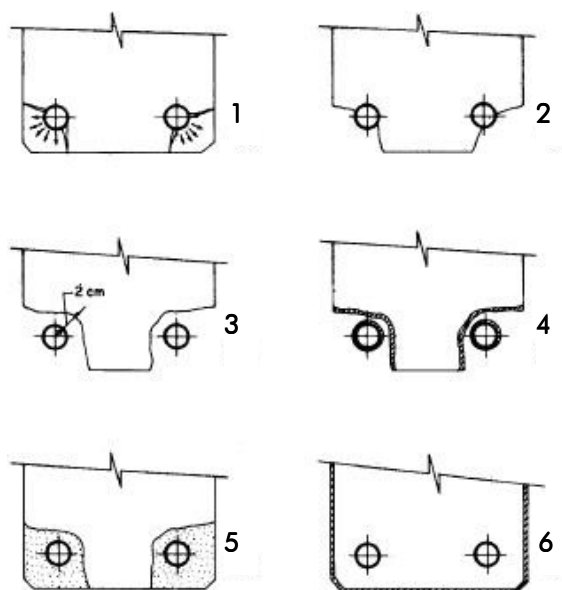


Figura 4.16 – Esquema de reparação de armaduras corroídas (Brito, 2005).

É fundamental que a resistência de ligação entre o material de reparação e o betão existente seja adequada. Assim, deverá ser avaliada através do ensaio de *pull-off*, realizado de acordo com a norma EN 1542, e ser superior a 1,5 MPa ou ao valor exigido em projecto.

#### ( iv ) Tratamento da fendilhação

Se, após a avaliação do substrato, se concluir que é necessário proceder ao tratamento da fendilhação, deve-se proceder ao seu preenchimento usando a injeção sobre pressão de resina epoxídica (Figura 4.17) de acordo com o ACI 224.1R, 1993.



Figura 4.17 –Injecção de fendas (Five Star Products, Inc, 2006).

É importante salientar que se, antes da injeção, se verificar escorrências de água através das fendas é imprescindível que estas sejam tratadas. Deve-se pois descobrir a razão dessa existência dessas escorrências e trata-las através da execução de uma passagem para a água e/ou uma protecção à mesma.

O sistema compósito de FRP apenas deve ser aplicado após 24 horas após a operação de injeção das fendas.

Repare-se que este procedimento pode facilmente originar rugosidades excessivas na superfície a reforçar. Nesses casos, a zona em causa, deve ser devidamente tratada como qualquer outro tipo de rugosidade excessiva.

## 4.4 Preparação e Verificação da Superfície

O sucesso da operação de reforço passa também pela adequada preparação da superfície. Esta pretende permitir uma ligação contínua e eficaz entre o compósito de FRP e o betão, prevenindo a ocorrência dos modos de ruína prematura por descolamento na superfície de contacto. Nesse sentido, no final da preparação, a superfície deverá apresentar-se limpa, com uma rugosidade limitada e com uma forma plana ou convexa.

Apresentam-se de seguida as sucessivas acções de preparação e verificação da superfície.

### ( i ) Remoção de obstruções

Todos os objectos embebidos e quaisquer outras obstruções que existam na superfície a reforçar, que possam afectar o desempenho ou a durabilidade do reforço, devem ser removidos. Como exemplo, pregos provenientes da cofragem, que por vezes ficam na superfície do elemento de betão e que podem facilmente cortar fibras do compósito de FRP.

### ( ii ) Decapagem da superfície

Pretende-se com a decapagem remover a leitada superficial de betão até a exposição dos agregados, como ilustrado na Figura 4.18. Este procedimento, como evidenciado no estudo de Ye et al., 1998, melhora significativamente a ligação entre o compósito de FRP e o substrato de betão. De facto, apresenta a dupla vantagem de se remover uma camada de betão, que é muitas vezes de propriedades inferiores à restante, e de melhorar a capacidade de aderência do adesivo pelo seu contacto directo com os agregados.

Durante o processo de decapagem também se deve objectivar, para além da referida exposição dos agregados, a eliminação de todas as irregularidades visíveis, como as saliências afiadas das rebarbas de cofragem, assim como, a remoção de todas as manchas de gorduras, óleos, produtos da cura, revestimentos de tinta, etc., ou seja, a remoção de quaisquer substâncias que possam potencialmente afectar a ligação do compósito de FRP ao betão.

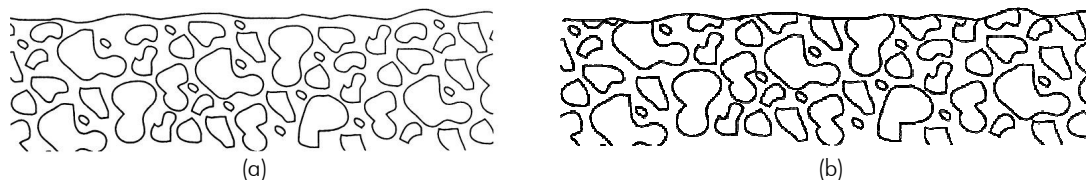


Figura 4.18 – Superfície do betão antes (a) e após (b) a decapagem (Hollaway et al., 2000).

Juvandes, 1999, recomenda como método de decapagem para os sistemas pré-fabricados, a passagem com jacto de areia, e para os sistemas curados “in situ”, que requerem uma superfície mais lisa, o polimento com um esmeril (Figura 4.19). Pode-se, no entanto, em ambos os casos, utilizar ferramentas e métodos similares, desde que os objectivos finais da decapagem sejam satisfeitos. Alerta-se que, na utilização jacto de água para a decapagem, se deve permitir ao substrato o tempo necessário para que seque completamente e consiga respeitar os teores de humidade máximos permitidos para a aplicação do sistema compósito de FRP.



Figura 4.19 – Decapagem com esmeril (a) e jacto de areia (b) (Rodrigues, 2005).

### ( iii ) Boleamento de arestas

De acordo com o ACI 440.2R-02, 2002 a superfície a reforçar não pode conter arestas com um raio de curvatura inferior a 15 mm. No caso de tal se verificar, estas devem ser boleadas até cumprirem com o referido limite (Figura 4.20).

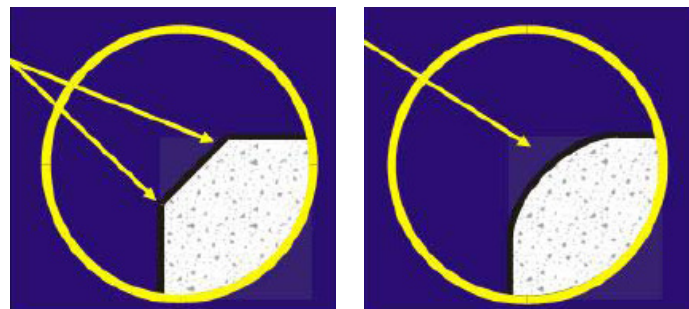


Figura 4.20 – Arredondamento das arestas (Karbhari et al., 2004).

### ( iv ) Limpeza da superfície

A superfície de contacto deverá ser limpa imediatamente antes do início da aplicação do sistema compósito de FRP, visando-se a remoção de poeiras, partículas estranhas ou quaisquer outras substâncias que possam potencialmente inibir a colagem.

Esta limpeza deverá ser efectuada, preferencialmente, por aspiração ou por jacto de ar, desaconselhando-se o uso de uma escova. No caso de se utilizar jacto de água, ressalva-se mais uma vez, que se deve permitir ao substrato o tempo necessário para secar completamente e respeitar os teores de humidade permitidos para a aplicação do sistema compósito de FRP.

Com o auxílio de uma fita adesiva consegue-se, de forma expedita, detectar a presença de partículas soltas, como poeiras, e assim aferir o estado de limpeza da superfície.

Para a manutenção do estado de limpeza da superfície, esta deve ser protegida, contra a reposição das referidas matérias indesejadas, durante o tempo que medeia a limpeza e a aplicação do sistema de reforço.

#### **( v ) Aplicação do primário**

Este é o primeiro constituinte dos sistemas compósitos de FRP a ser aplicado. Como já referido, nem todos os fabricantes impõem a utilização de um primário, não o englobando nos seus sistemas. Mas a sua aplicação é sempre vantajosa, uma vez que melhora significativamente a resistência da colagem, especialmente em substratos com pouca rugosidade (Ye et al., 1998). A sua aplicação fica portanto dependente da recomendação do fabricante ou da imposição do projecto.

A aplicação do primário é ilustrada na Figura 4.21.



Figura 4.21 – Aplicação do primário.

A camada de primário deve ser aplicada uniformemente, com uma ou duas demão, respeitando o consumo indicado pelo fabricante.

É importante que, se o primário a aplicar não fizer parte do sistema de reforço escolhido, se verifique e comprove a sua compatibilidade com os restantes produtos do sistema compósito de FRP a aplicar. É também importante que a aplicação destes últimos ocorra entre 1,5 a 48 horas após a aplicação do primário e sempre depois de este deixar de estar no estado pegajoso (verificado com o toque dos dedos) (NCHRP Report 514, 2004). No entanto, se tal não for possível e se chegarem a passar sete dias após a aplicação do primário, antes de se proceder à aplicação do subsequente produto, a camada de primário deverá ser tornada áspera, através do uso de uma lixa de areia ou de outro método similar com o objectivo de a desvitrificar. Esse procedimento melhorará a capacidade de aderência do produto que se vier a aplicar sobre este (NCHRP Report 514, 2004).

O manuseamento do primário, como de qualquer resina epoxídica constituinte do sistema compósito de FRP, deve respeitar o especificado no Ponto 4.5 do presente capítulo.



Com o objectivo de possibilitar o controlo de qualidade da ligação entre o *Primário* e o substrato de betão devem ser executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de *pull-off*.

Para que estas zonas de amostragem sejam representativas deve existir a preocupação de as executar nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. A dimensão e a frequência da execução destas zonas de amostragem devem estar de acordo com a complexidade e importância da obra de reforço, e ainda contemplar a possibilidade de mais ensaios ao longo do tempo de serviço da estrutura.

A execução dos ensaios e a interpretação dos seus resultados será abordada no Capítulo 5 dedicado ao controlo de qualidade.

#### ( vi ) Preenchimento de cavidades e suavização de arestas

A existência de depressões excessivas na superfície a reforçar causa o desenvolvimento de forças de desvio no compósito de FRP que podem levar à ruína prematura por destacamento. Por outro lado, a existência de arestas vivas, como referido no ponto dedicado à decapagem da superfície, compromete o desempenho do reforço. Assim, com o objectivo de evitar a ocorrência dessas situações deverá utilizar-se uma argamassa de regularização (*Putty*) para o seu preenchimento ou suavização (Figura 4.22), respectivamente.

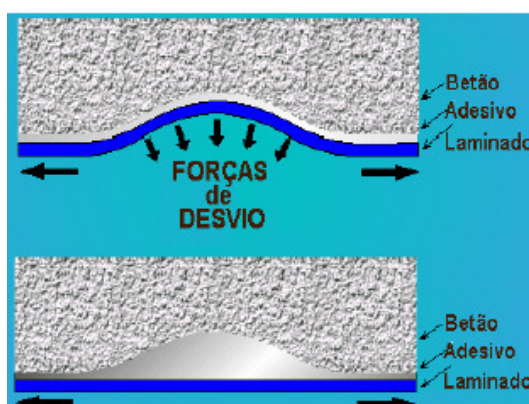


Figura 4.22 – Forças de desvio (Rodrigues, 2005).

A argamassa de regularização deverá curar pelo menos durante 7 dias antes do início da aplicação do compósito de FRP, a menos que a sua cura e resistência sejam comprovadas por ensaios adicionais.

Tal como no primário, e para qualquer resina epoxídica, o manuseamento da argamassa de regularização deve respeitar o especificado no Ponto 2.5 do presente capítulo.

Mais uma vez, como recomendado para o primário, com o objectivo de possibilitar o controlo de qualidade da ligação entre a argamassa de regularização e o substrato de betão, ou com o próprio primário, devem

ser executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de *pull-off*.

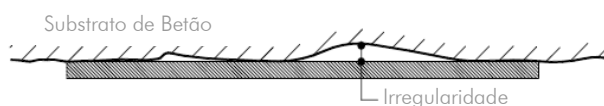
Mais uma vez também se salienta que, estas zonas de amostragem, para serem representativas, deverão ser executadas nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. A dimensão e a frequência da execução das referidas zonas deverão estar de acordo com a complexidade e importância da obra de reforço e ainda contemplar a possibilidade de mais ensaios ao longo do tempo de serviço da estrutura.

A execução dos ensaios e a interpretação dos seus resultados será abordada no Capítulo 5 dedicado ao controlo de qualidade.

#### (vii) Verificação da rugosidade da superfície

Várias das acções de preparação da superfície, como a *Decapagem* e a aplicação de *Argamassa de Regularização*, visaram a redução da rugosidade da superfície. De facto, se esta se encontrar dentro dos limites admissíveis, a possibilidade de ruínas prematuras por destacamento da interface do *Sistema* compósito de FRP com o substrato de betão, é minimizada. O fib Bulletin N°14, 2001 aponta quais as irregularidades admitidas consoante o tipo de sistema a aplicar (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Irregularidades admitidas segundo o fib Bulletin N°14, 2001.



TIPO DE SISTEMA	IRREGULARIDADE ADMITIDA	
	Em 2 metros de desenvolvimento	Em 0,3 metros de desenvolvimento
Pré-fabricado (espessura > 1 mm)	10 mm	4 mm
Pré-fabricado (espessura < 1 mm)	6 mm	2 mm
Curado "in situ"	4 mm	2 mm

A medição da rugosidade poderá ser executada de forma expedita com o auxílio de uma régua com um comprimento de 0,3 metros ou de 2 metros, como plano de referência (Figura 4.23). Após a sua colocação ao longo da superfície a reforçar, mede-se a distância entre esta e a superfície, conseguindo-se assim, avaliar os desvios máximos (Loov et al., 1990).



Figura 4.24 – Medição da rugosidade com o auxílio de uma régua (Hollaway et al., 2000).

A avaliação da rugosidade da superfície também se pode executar através de *Laser Profilometry* (Figura 4.25). Este método, recentemente desenvolvido, é baseado na tecnologia laser e segundo Maerz et al., 2001 trata-se uma forma efectiva para medir e caracterizar a superfície.

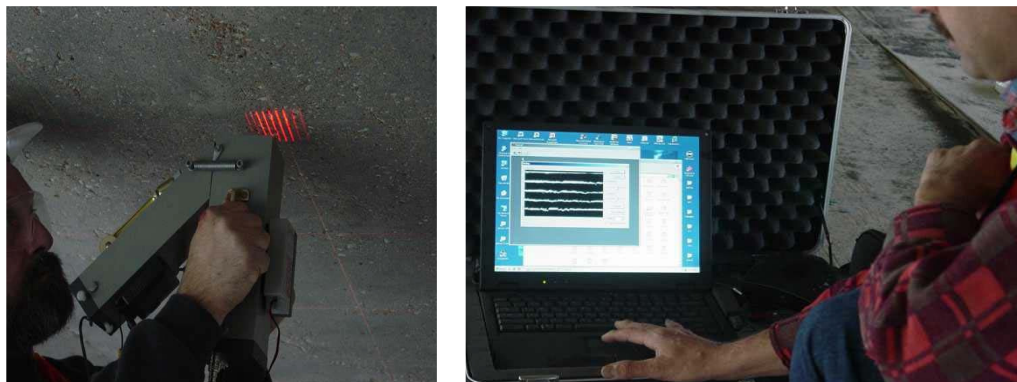


Figura 4.25 – Sistema “Laser Profilometry” (Maerz et al., 2001).

A permissão de uma maior tolerância para as irregularidades admitidas no sistema pré-fabricado advém da rigidez do laminado de FRP e da maior viscosidade e tixotropia do adesivo em relação à resina de impregnação do sistema curado “*in situ*”, que requer, com frequência, a aplicação da argamassa de regularização para cumprir com o requerido (fib Bulletin Nº14, 2001).

#### 4.5 Manuseamento de Resinas Epoxídicas

Embora o manuseamento da resina se integre dentro das operações de preparação do substrato e de aplicação do compósito de FRP, devido à sua importância fulcral para o sucesso do reforço e pela susceptibilidade do seu manuseamento, as questões relacionadas com a sua utilização são aqui tratadas isoladamente.

**( i ) *Shelf time***

Como já referido no item deste capítulo dedicado à recepção dos materiais, os componentes da resina têm uma validade limitada. De facto, as suas propriedades não são imutáveis com o tempo. Findo o seu *shelf time*, não se pode garantir a reactividade desejada entre os componentes na sua mistura, e consequentemente, também não se poderão garantir as propriedades finais da resina após a sua cura. Assim, para que se possa esperar o desempenho reclamado para as resinas pelo fabricante, deve-se, imediatamente antes da utilização de cada componente verificar se este se encontra dentro do seu *shelf time*. Deve-se ainda verificar se as embalagens se encontram invioladas pois a sua exposição ao ambiente afecta a extensão do *shelf time*.

**( ii ) Condições higrotérmicas**

O desempenho das resinas epoxídicas ao longo do período de vida do reforço depende directamente das condições higrotérmicas no momento da sua cura, tanto do ambiente como do substrato. É portanto fundamental que estas condições sejam controladas antes de todas as operações que envolvam a utilização destas resinas.

De facto, sempre que os níveis de humidade e temperatura se encontrem fora das especificadas pelo fabricante, não é permitida a aplicação de qualquer produto do sistema compósito de FRP.

Também os diversos regulamentos e as diversas publicações impõem os seus limites (que não se devem sobrepor aos do fabricante). Para o substrato, o fib Bulletin N°14, 2001, exige que a temperatura mínima de aplicação seja superior ao ponto de orvalho mais 5 °C e que a humidade relativa máxima admissível é de 80%. Segundo o NCHRP Report N°14, 2004, a temperatura de aplicação deve situa-se entre os 10 e os 35 °C, este último refere ainda que a quantidade de água no substrato deverá ser inferior a 10% (avaliada de acordo com o ACI 503R-93, 1993). Ressalva-se que, as restrições relacionadas com a humidade, poderão ser desprezadas no caso de uso de resinas formuladas especificamente para aplicações em condições húmidas.

A Tabela 4.2 identifica a temperatura do ponto de orvalho em função das condições higrotérmicas ambiente verificadas no momento da aplicação.

Tabela 4.2 – Temperatura do ponto de orvalho em função da humidade e temperatura.

		HUMIDADE RELATIVA (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	5	-24,3	-16,2	-11,3	-7,6	-4,6	-2,1	0,0	1,8	3,5	5,0
	7	-22,7	-14,5	-9,5	-5,8	-2,7	-0,2	1,9	3,8	5,4	7,0
	9	-21,2	-12,8	-7,8	-4,0	-0,9	1,7	3,9	5,8	7,4	9,0
	11	-19,6	-11,2	-6,0	-2,2	1,0	3,6	5,8	7,7	9,4	11,0
	13	-18,1	-9,5	-4,3	-0,4	2,8	5,5	7,7	9,7	11,4	13,0
	15	-16,6	-7,8	-2,6	1,4	4,7	7,4	9,6	11,6	13,4	15,0
	17	-15,0	-6,2	-0,8	3,2	6,5	9,3	11,6	13,6	15,3	17,0
	19	-13,5	-4,5	0,9	5,0	8,4	11,1	13,5	15,5	17,3	19,0
	21	-12,0	-2,9	2,7	6,8	10,2	13,0	15,4	17,5	19,3	21,0
	23	-10,4	-1,2	4,4	8,6	12,1	14,9	17,3	19,4	21,3	23,0
	25	-8,9	0,5	6,1	10,4	13,9	16,8	19,3	21,4	23,2	25,0
	27	-7,4	2,1	7,9	12,2	15,8	18,7	21,2	23,3	25,2	27,0
	29	-5,9	3,8	9,6	14,0	17,6	20,6	23,1	25,3	27,2	29,0
	31	-4,4	5,4	11,3	15,8	19,4	22,5	25,0	27,2	29,2	31,0

Todas as condições higrotérmicas devem ser avaliadas no local recorrendo a equipamento próprio.

Como forma auxiliar expedita para controlo da humidade da superfície, pode-se pressionar um papel absorvente sobre a superfície, se este conseguir absorver humidade é provável que o substrato esteja com humidade excessiva.

Quando a temperatura ambiente for excessivamente baixa e os níveis de humidade excessivamente elevados, de forma a não permitirem a aplicação das resinas, podem-se empregar meios auxiliares para a normalização destes parâmetros. Com efeito, para fazer subir a temperatura para valores admissíveis podem-se utilizar fontes auxiliares de calor. Salienta-se apenas que estes aumentos devem ser cuidadosamente controlados para que nunca se atinjam valores de temperatura que levem à degradação da resina. No caso de a quantidade de água na superfície ser superior ao especificado pode ser utilizado ar pressurizado para a secar até um nível aceitável.

Para além do controlo da temperatura no momento da cura, e de acordo com a EN 1504 Parte 4, é também imprescindível que durante o período de serviço da estrutura, se garanta que as temperaturas máximas no substrato não ultrapassem os 20 °C (ou que o Tg da resina seja superior a 45 °C).

### ( iii ) Mistura dos componentes da resina

Como já referido no Capítulo 3, é fundamental para o desempenho da resina que a sua mistura seja devidamente executada.

Para tal é fundamental que a mistura cumpra com o rácio especificado para cada um dos seus componentes. É, nesse sentido, aconselhável, para minimizar as possibilidades de desvios do correcto doseamento, que se utilizem as embalagens dos componentes por completo, uma vez que as suas quantidades estão usualmente de acordo com o seu rácio.

Também é extremamente importante que a mistura seja executada a baixa velocidade para que se previna a introdução de ar. Os fabricantes costumam especificar qual a velocidade máxima a que o misturador eléctrico deve funcionar.

O processo de mistura deve continuar até que se verifique que esta se apresenta homogénea, cor e consistência uniforme.

A Figura 4.26 mostra o processo de mistura utilizando um misturador eléctrico.



Figura 4.26 – Mistura dos componentes da resina.

Como complemento à aferição do correcto doseamento dos componentes da resina pode-se inspeccionar as embalagens vazias e verificar se existem restos significativos o que, a ocorrer, indicará um incorrecto doseamento.

As resinas epoxídicas são consideradas como perigosas para a saúde humana. De facto, os seus componentes são corrosivos, irritantes e nocivos, quer para o homem quer para o ambiente (Correia, 2006; Leite et al., 2007).

Com efeito, as resinas epoxídicas são irritantes para os olhos e para a pele. O seu repetido contacto com a pele pode provocar a sua secura ou mesmo a sua fissuração. As resinas também são tóxicas, a inalação dos seus vapores pode provocar sonolência e vertigens. Existe ainda a possibilidade de provocar queimaduras pois a reacção entre os seus componentes é exotérmica.

Assim sendo, é obrigatório usar vestuário adequado de protecção, como luvas de borracha (butílica ou nitrílica), óculos protectores hermeticamente fechados e roupas de trabalho e providenciar ventilação ou exaustão suficiente no local de trabalho e/ou utilizar protecção respiratória.

#### **( iv ) Tempo de utilização (*pot life*)**

Após a mistura dos componentes existe um intervalo de tempo dentro do qual é possível a utilização eficaz da resina tanto em termos do seu manuseamento como em termos do seu desempenho após a cura. Esse período de tempo é designado por tempo de utilização, inicia-se logo após a junção dos componentes e termina quando a viscosidade da resina e o seu nível de polimerização ultrapassam determinados valores considerados como críticos.

Este intervalo de tempo varia de resina para resina, consoante a sua formulação química, e com a temperatura ambiente no momento da mistura. De facto, o aumento de temperatura implica um aumento na velocidade de polimerização da resina que por sua vez implica um aumento de viscosidade.

Portanto a resina deve ser aplicada sempre dentro do seu tempo de utilização, não só pela limitação que uma viscosidade excessiva impõe ao seu manuseamento, mas também, e principalmente, pelo menor desempenho desta devido ao facto de uma maior percentagem das reacções de cura ocorrerem antes do contacto com as superfícies a unir.

Com o intuito de prolongar o tempo de utilização das resinas, ou mesmo para possibilitar o seu uso no caso de temperaturas ambiente elevadas, os componentes podem ser previamente arrefecidos, submergindo as suas embalagens, ainda seladas, em água gelada.

Como a reacção entre os componentes é exotérmica, após a sua mistura, a temperatura aumenta implicando uma redução no tempo de utilização. Como é lógico a temperatura no interior da mistura atingirá valores mais altos para maiores volumes da mesma, concluindo-se que o tempo de utilização será maior se se proceder à divisão da mistura, em recipientes separados, imediatamente após a sua execução.

#### **( v ) Consumos**

A verificação da espessura da camada de adesivo nos sistemas pré-fabricados e da espessura dos compósitos de FRP curados *"in situ"*, assim como o controlo da impregnação destes últimos, pode ser feita através dos consumos de resina. É, no entanto, importante ter presente que estes valores são sensíveis tanto à textura da superfície como à porosidade do substrato, e ainda que não têm em consideração eventuais desperdícios ou distribuições não uniformes de resina que possam ocorrer. Considera-se assim que a sua satisfação é condição necessária, mas não suficiente, para se aferir que a quantidade de resina utilizada tenha sido a adequada.

Uma outra forma de controlar a quantidade de resina aplicada, ou pelo menos a homogeneidade da sua distribuição é, desde que esta seja pigmentada, a cor que apresenta após a aplicação na superfície. Assim, uma cor mais carregada significará uma quantidade de resina superior ao pretendido e uma cor mais esbatida significará uma quantidade inferior.

**( vi ) Recolha de amostras**

As propriedades finais da resina dependem, para além da sua formulação química, do processo de mistura e das condições de cura verificadas em obra. Não é portanto, possível, garantir que as suas propriedades após a cura sejam as reclamadas pelo fabricante, tornando-se indispensável, para se assegurar o adequado comportamento do reforço, que as suas propriedades sejam avaliadas por ensaios realizados em laboratório.

Este controlo de qualidade é objecto do Capítulo 5, no entanto, como a necessária recolha de amostras é processada em obra faz-se aqui referência à mesma.

Devem ser recolhidas amostras de todas as misturas realizadas, estas devem curar em obra nas condições do restante mistura.

Enquanto não surgem propostas normativas concordantes, e de modo a prosseguir com a orientação da Norma EN 1504, sugere-se que a quantidade e as dimensões das amostras a recolher em obra sejam os seguintes:

- 3 Amostra com 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> (prismas)
- 1 Amostra com 300 x 200 x 4 mm<sup>3</sup> (placa)

As amostras devem ser acompanhadas com a informação relativa à temperatura e humidade verificadas no momento da sua recolha.

**( vii ) Tempo de cura**

O período necessário para que a resina cure até que exiba as propriedades reclamadas pelo fabricante depende de vários factores, dos quais se destaca pela sua maior influência, a temperatura.

A cura pode ser feita a frio, ou seja, à temperatura ambiente ou a quente, recorrendo-se a fontes auxiliares de calor. O tempo de cura a frio depende da formulação da resina e, como evidenciado, da temperatura ambiente, neste caso, a cura total da resina é geralmente atingida em apenas alguns dias (NCHRP Report 514, 2004). Com a cura a quente é possível conseguir uma cura completa ao fim de apenas algumas horas. Para promover esse aquecimento podem ser utilizados diferentes sistemas, como aquecedores eléctricos, sistemas de aquecimento por IR (infravermelhos) e cobertores aquecedores.

Em qualquer dos casos devem ser sempre respeitadas as indicações dos fabricantes para a cura e permitir ao sistema o tempo especificado para curar até que a estrutura seja posta em carga.



## 4.6 Aplicação do Compósito de FRP

Esta secção especifica os procedimentos para a aplicação dos compósitos de FRP quer se utilizem sistemas pré-fabricados quer se utilizem sistemas curados *"in situ"*. Estes podem variar ligeiramente, dependendo do fabricante, e dentro do mesmo fabricante, do seu do sistema.

Antes de se apresentarem os procedimentos de aplicação de cada tipo de sistema. Indicam-se disposições relativas, tanto ao escoramento como ao equipamento, que são comuns a ambos os Sistemas Compósitos de FRP.

É evidentemente por questões de segurança que se deve avaliar a necessidade de um escoramento temporário dos elementos a reforçar. Este escoramento pode ser executado através de métodos convencionais e apenas deve ser removido quando o compósito de FRP estiver completamente curado ou de ter adquirido a sua resistência de dimensionamento comprovada através de ensaios.

É importante que se verifique, antes do início da aplicação, se o empreiteiro dispõe de todo o equipamento necessário à correcta aplicação e à segurança dos trabalhadores, nas quantidades necessárias e em condições limpas, visando-se uma aplicação contínua e eficaz do compósito de FRP.

### 4.6.1 Laminado de FRP

Neste ponto apresentam-se os procedimentos para a aplicação do Laminado de FRP.

#### ( i ) Preparação do laminado de FRP

Como os laminados de FRP são geralmente fornecidos em rolos com comprimentos na ordem dos 50 metros, a sua preparação inicia-se com o corte dos mesmos, de modo a ficar com elementos do comprimento especificado em projecto, consoante o local a que se destinam.

A face destinada à colagem do laminado de FRP também necessita de ser preparada. A obrigatoriedade ou não desse tratamento constará nas especificações emitidas pelos fabricantes, sendo que será sempre aconselhável. De facto, alguns sistemas especificam logo à partida que se proceda à abrasão e/ou à limpeza com um solvente adequado como a acetona da face de colagem. Outros sistemas possuem uma película protectora e nesses casos, apenas é necessária a sua remoção para que a superfície fique pronta para a colagem. É recomendado que se execute a referida remoção da película na direcção paralela ao laminado de FRP e não na sua direcção perpendicular, como ilustrado na Figura 4.27. Tanto a limpeza da superfície como a remoção da película deverão ser executados apenas imediatamente antes da aplicação do Laminado de FRP.



Figura 4.27 – Remoção da película de protecção (TRADECC, 2005).

É importante que, também que antes da aplicação do laminado de FRP, se proceda à sua inspecção visual no sentido de se aferir a sua integridade que poderá ter sido afectada pelo transporte, descuido no manuseamento ou mesmo no processo de corte.

## ( ii ) Aplicação do adesivo

O NCHRP Report 514, 2004 recomenda que o adesivo seja aplicado em ambas as faces a colar, salvaguarda-se no entanto, que esta publicação também revela que existem estudos que concluem que com a aplicação em apenas uma das superfícies se obtêm resultados similares. Fundamental é que o adesivo seja aplicado sobre as superfícies a colar em forma de cúpula, ou seja, a zona interior com uma espessura maior que a exterior (Figura 4.28), no sentido de se reduzir o risco de aprisionamento de ar durante a junção do laminado de FRP com o substrato.

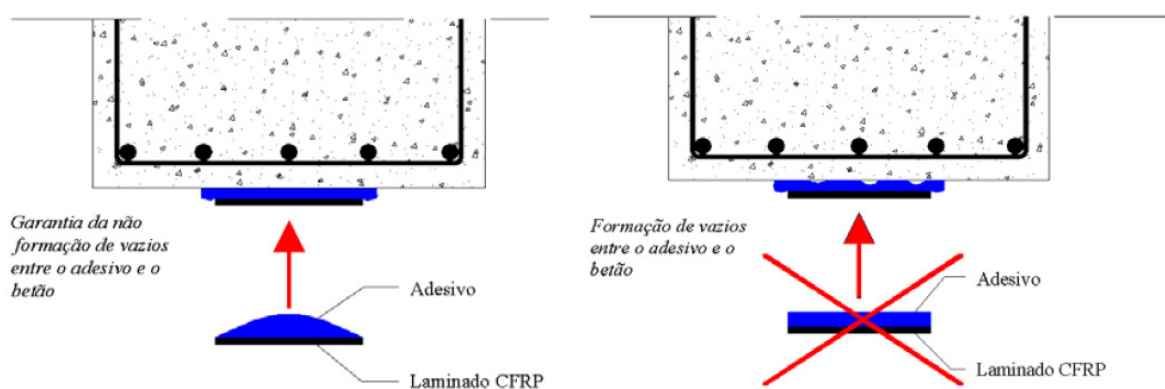


Figura 4.28 – Aplicação do Adesivo em forma de cúpula (Campos et al., 2006).

É importante aplicar o adesivo imediatamente após a sua mistura para dissipar o calor gerado pelas reacções de polimerização da resina com o endurecedor, e assim estender o seu tempo de utilização.

### ( iii ) Aplicação do laminado de FRP sobre a superfície

O laminado de FRP deve ser pressionado com o auxílio de um rolo contra a superfície de betão, até que este surja lateralmente, indicando assim que o adesivo se encontra sobre toda a área de contacto (Figura 4.29). Para facilitar a remoção dos excessos que surgem lateralmente pode-se colocar uma fita de máscara sobre o betão contiguamente às faces do laminado de FRP.

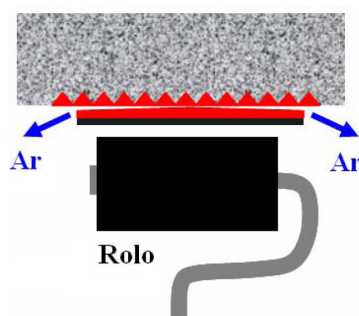


Figura 4.29 – Pressão sobre o laminado de FRP com rolo (SIKA, 2006).

A pressão deverá ser exercida até que se verifique uma espessura final, constante ao longo de todo o laminado de FRP, de 1,5 a 2,0 mm (fib Bulletin N°14, 2001) de camada de adesivo. Espessuras maiores conduzirão a um desperdício de um material de custo elevado e espessuras inferiores originarão um comportamento frágil por parte da junta.

Nos cruzamentos de laminados de FRP (Figura 4.30), a variação de espessura deverá ser gradual e respeitar os limites dispostos na Tabela 4.1.



Figura 4.30 – Cruzamentos de laminados (Kaiser et al., 2001).

Em geral não é necessária a aplicação de sistemas de pressão exteriores para manter o laminado de FRP na sua posição durante a cura.

É importante ter consciente, na aplicação do laminado de FRP, que desvios superiores a 5° em relação ao alinhamento previsto em projecto afecta significativamente o desempenho do reforço (Yang et al., 2001).

#### **( iv ) Aplicação de várias camadas de laminado de FRP**

Em aplicações com mais que uma camada de laminados de FRP, o processo de aplicação de cada camada adicional deverá ser executada de acordo com as mesmas especificações da primeira.

O fib Bulletin N°14, 2001 não recomenda que se apliquem mais de 3 camadas de laminados de FRP, a menos que a seu desempenho seja comprovado em ensaios experimentais.

#### **( v ) Execução de sobreposições/emendas de laminados de FRP**

Sempre que exista uma interrupção do laminado de FRP, deve ser executada uma emenda com um comprimento de sobreposição igual ao especificado no projecto, não podendo este valor, segundo o NCHRP Report 514, 2004, em caso algum ser inferior a 150 mm. A alternância dos locais das sobreposições das várias camadas adjacentes é obrigatória, a menos que permitido pelo projecto.

Não é necessário fazer emendas na direcção transversal, a menos que especificado no projecto (NCHRP Report 514, 2004).

#### **( vi ) Execução da amarração do Laminado de FRP**

Muitas vezes é previsto em projecto a execução de amarrações nas extremidades e/ou em pontos discretos do Laminado de FRP para a prevenção de delaminações prematuras do sistema. Além de se recomendar que se cumpram devidamente as especificações de projecto para a sua execução, no caso de amarrações mecânicas, aconselha-se a um cuidado especial para que não se danifique o laminado de FRP ou o substrato de betão. Na utilização de amarrações em aço é importante que se tomem as devidas precauções para se evitar o desenvolvimento de corrosão, devido ao contacto directo do laminado de FRP com a armadura no substrato de betão (Torres-Acosta, A., 2002).

#### **( vii ) Processo de cura**

Como já enunciado no ponto dedicado ao manuseamento de resinas, o sistema compósito de FRP pode curar à temperatura ambiente, cura a frio, ou utilizando-se fontes auxiliares de calor, cura a quente. Em qualquer um dos casos é fundamental garantir que durante o seu período de cura se proporcionem todas as condições necessárias para que o processo de endurecimento se dê por completo e em tempo útil.

Assim, no caso da cura a frio, devem ser respeitadas as condições higrotérmicas, impostas nas especificações dispostas pelo fabricante, desde o início do processo de cura, ou seja, desde a junção dos componentes. A evolução da cura deve ser monitorizada no sentido de se aferir a sua homogeneidade ao

longo de toda a interface e, na detecção de alguma anomalia, a continuação do processo deve ser de imediato interrompida e as suas causas detectadas e resolvidas.

A cura a quente, que objectiva a minimização do tempo de cura ou a colagem com temperaturas excessivamente baixas, baseia-se no aquecimento do sistema compósito de FRP imediatamente após a sua aplicação. Esse incremento de temperatura acelera o processo de polimerização da resina implicando uma redução no tempo de cura.

Para promover esse aquecimento podem ser utilizados diferentes métodos, como aquecedores eléctricos, sistemas de aquecimento por infravermelhos (IR) e cobertores aquecedores.

No caso do sistema pré-fabricado, tirando partido da condutividade eléctrica das fibras de carbono, é ainda possível utilizar um método cujo aquecimento é originado pela aplicação de corrente eléctrica nos laminados de FRP (Figura 4.31).



Figura 4.31 – Sistema de cura rápida da Sika (SIKA, 2003).

Como consequência do aquecimento do sistema compósito de FRP, não só se consegue uma maior velocidade da aplicação, a 70 °C a cura total pode ser conseguida em apenas 3 horas (fib Bulletin N°14, 2001), como também se consegue um aumento da Tg do adesivo.

Para ambos os tipos de cura, ainda que com especial relevância para a cura a frio, se durante o período de cura do sistema compósito de FRP este estiver sujeito a um ambiente chuvoso, a grandes variações térmicas, a uma forte insolação ou à presença de poeiras devem ser tomadas medidas de protecção que assegurem a adequada cura do sistema. É também importante que se evite a indução de vibrações na estrutura, para que se evite a formação de bolhas no interior da resina.

Por razões óbvias, a estrutura reforçada só deve ser sujeita à carga máxima após o término do período de cura, a menos de indicação contrária no projecto ou demonstrado através de ensaios específicos para o efeito.

#### ( viii ) Execução de zonas de amostragem

Como disposto para o primário e para a argamassa de regularização, mas neste caso com o objectivo de possibilitar não só o controlo de qualidade da ligação entre o compósito de FRP e o substrato de betão mas também entre as suas várias camadas, devem ser previstas e executadas zonas de amostragem em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de avaliação da aderência entre os materiais.

Mais uma vez, estas zonas de amostragem, para serem representativas devem ser executadas nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. A dimensão e a frequência da execução das referidas zonas devem estar de acordo com a complexidade e importância da obra de reforço e ainda contemplar a possibilidade de mais ensaios ao longo do tempo de serviço da estrutura. O NCHRP Report 514, 2004 sugere um mínimo de 1 ensaio de *pull-off* por cada 93 m.l. de sistema compósito de FRP aplicado e por tipo de substrato.

A execução dos ensaios e a interpretação dos seus resultados é objecto do Capítulo 5 dedicado ao Controlo de Qualidade.

#### 4.6.2 Compósito de FRP Curado “*in situ*”

Este ponto especifica os procedimentos para a construção do compósito de FRP quando se utilizam sistemas curados “*in situ*”, a partir de Mantas/Tecidos, secos ou pré impregnados e resina de impregnação.

Nestes sistemas, como já referido, a resina de Impregnação tem a função de impregnar e polimerizar as fibras, constituindo-se assim o compósito de FRP, e a função de adesivo, ligando o compósito de FRP ao substrato.

A impregnação das fibras pode ser feita no substrato ou previamente à sua colocação no neste. Na impregnação no substrato (Ponto 4.6.2.1) a impregnação das fibras acontece apenas no momento em que estas são colocadas sobre o substrato e entram em contacto com a resina de impregnação. Na impregnação prévia (Ponto 4.6.2.2) a impregnação das fibras é feita imediatamente antes da sua aplicação, esta pode ser manual ou utilizando uma máquina de impregnação.

Segundo a publicação da MBACE, 2004, se as mantas/tecidos a aplicar forem de uma gramagem superior a 400 g/m<sup>2</sup>, apenas é permitida a impregnação prévia das fibras fora do substrato.

Segue-se uma descrição de cada um dos procedimentos de aplicação, primeiro para o caso da impregnação no substrato e de seguida para o caso da impregnação prévia.

#### 4.6.2.1 Impregnação no Substrato

##### ( i ) Aplicação da primeira camada de resina de impregnação (*undercoat*)

O primeiro passo da aplicação, tanto para a impregnação no substrato como para a impregnação prévia é o espalhamento de uma camada de resina de impregnação sobre a superfície destinada a receber o reforço.

Esta camada de resina deve ser aplicada uniformemente e respeitar o consumo especificado pelo fabricante. A sua aplicação pode ser feita com auxílio de um rolo e, mais uma vez, deve ocorrer imediatamente após a mistura, para que se consiga completar a aplicação do sistema curado “*in situ*” antes do fim do tempo de utilização da mistura, ou seja, enquanto esta se encontra com a viscosidade adequada para a total impregnação das fibras.

##### ( ii ) Aplicação da manta/tecido

Tal como os laminados de FRP, as mantas/tecidos são geralmente fornecidos em rolos com comprimentos na ordem dos 50 metros, portanto também a sua preparação se inicia com o corte das mesmas, de modo a ficar com elementos do comprimento especificado em projecto, consoante o local a que se destinam.

Após o corte é importante que se proceda a uma inspecção visual para que se verifique que as mantas/tecidos não apresentam quaisquer danos devido ao transporte, manejamento ou corte e que estão livres de qualquer tipo de impurezas, como óleos, poeiras, etc.

Claro que esta preparação e verificação da manta/tecido devem ser efectuadas antes da aplicação da primeira camada de resina de impregnação para que se aproveite ao máximo o seu tempo de utilização.

Se existente, a película protectora das mantas/tecidos deve ser removida, e é então colocada e pressionada sobre a primeira camada de resina de impregnação. Para exercer pressão sobre as fibras no sentido de as impregnar e expulsar todo o ar que fique entre estas e a superfície de betão poderá ser utilizado um rolo (de um material não absorvente). Este apenas deve ser utilizado na direcção paralela à direcção das fibras. Na aplicação de tecidos, o rolo deve ser inicialmente utilizado na direcção do desenvolvimento do tecido, de extremidade a extremidade, e apenas depois, na direcção perpendicular a esta.

As fotos da seguinte Figura 4.32 a mostram a aplicação de uma manta sobre a laje de betão seguida pela passagem do rolo.



Figura 4.32 – Aplicação da manta e impregnação com a ajuda de rolo.

Mais uma vez, tal como na utilização de sistema pré-fabricados, é importante ter consciente na aplicação do compósito que desvios superiores a 5° em relação ao alinhamento previsto em projecto afecta significativamente o desempenho do reforço (Yang et al., 2001).

### ( iii ) Segunda camada de resina de impregnação (*overcoat*)

Logo após a conclusão a fase anterior, aplica-se mais uma camada de resina de impregnação sobre a manta/tecido, e como recomendado para a primeira camada, esta também deverá ser uniforme e respeitar o consumo especificado pelo.

Este processo de aplicação (*undercoat + manta/tecido + overcoat*) deverá ser executado sem interrupções.

Em geral não é necessária a aplicação de sistemas de pressão exteriores para manter o compósito de FRP na sua posição durante a cura.

### ( iv ) Aplicação de várias camadas de mantas/tecidos

Em aplicações com mais que uma camada de manta/tecido, o processo de aplicação de cada camada adicional é idêntico ao descrito para a primeira. No entanto, é importante que a quantidade de resina entre camadas seja superior (uma vez que esta camada é o *Overcoat* da camada inferior e o *Undercoat* da superior). O NCHRP Report 514, 2004 especifica que este incremento deve ser de 15-20%.

Cada camada adicional deve ser preferencialmente aplicada antes do início da cura da camada anterior. No caso de tal não ser possível, e a camada sobre a qual se vai aplicar a próxima camada, se encontrar curada, é necessário proceder à sua preparação, recorrendo ao uso de uma lixa de areia e ao eventual preenchimento com argamassa de regularização.

O fib Bulletin N°14, 2001 não recomenda que se apliquem mais de 5 camadas de manta/tecido, a menos que a seu desempenho seja comprovado em ensaios experimentais.



**( v ) Execução de sobreposições/emendas de compósito de FRP , ( vi ) Execução da amarração do compósito de FRP e ( vii ) Processo de cura**

A estes procedimentos aplica-se na íntegra o descrito para os laminados de FRP no Ponto 4.6.1.

**( viii ) Execução de zonas de amostragem e de provetes de Compósito de FRP**

Tal como especificado para o laminado de FRP, com o objectivo de possibilitar o controlo de qualidade da ligação entre as várias camadas do sistema compósito de FRP e entre este e o substrato de betão devem ser previstas e executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de aderência sobre a interface, como os ensaios de *Pull-Off*. Mas, no caso dos Sistemas Curados "*in situ*", para o controlo das propriedades do compósito de FRP, uma vez que este é construído em obra, também se deve construir provetes de compósito de FRP para posteriores ensaios em laboratório.

Os provetes também devem ser executados, tanto quanto possível, nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. Não existindo ainda propostas normativas para a dimensão destes provetes propõe-se que estes sejam de 300 x 500 mm<sup>2</sup> (com o nº de camadas igual ao da obra/zona em questão).

A dimensão e a frequência da execução das zonas de amostragem e dos provetes devem estar de acordo com a complexidade e importância da obra de reforço e ainda contemplar a possibilidade de mais ensaios ao longo do tempo de serviço da estrutura. O NCHRP Report 514, 2004 sugere um mínimo de 1 ensaio de *pull-off* por cada 93 m<sup>2</sup> de sistema compósito de FRP aplicado e por tipo de substrato. Parece lógico que a execução dos provetes respeite essa mesma frequência de amostragem.

#### **4.6.2.2 Impregnação Prévia**

**( i ) Primeira camada de resina de impregnação (*undercoat*)**

A este procedimento aplica-se na íntegra o descrito para o caso anterior de *Impregnação no Substrato*.

**( ii ) Impregnação prévia e aplicação da Manta/Tecido**

A Impregnação Prévia da Manta/Tecido deve decorrer ao mesmo tempo da colocação da primeira camada de resina de impregnação, tentando que estes dois processos terminem ao mesmo tempo. O objectivo de realizar estes dois procedimentos em simultâneo é o de otimizar o *pot life* da resina para que se complete a aplicação dentro deste período de tempo, ou seja, enquanto esta se encontra com a viscosidade adequada para a total impregnação das fibras.

É mais uma vez importante que se proceda à preparação e verificação da manta/tecido antes do início da mistura da resina de impregnação para a impregnação prévia. Como no método de impregnação no substrato, a preparação consiste no corte no comprimento pretendido e na remoção da sua película

protectora, se existente. Também se deve proceder a uma inspecção visual para que se verifique que as manta/tecido não apresentam quaisquer danos devido ao transporte, manejamento ou corte e que estão livres de qualquer tipo de impurezas, como óleos, poeiras, etc.

A manta/tecido pode ser impregnada manualmente (Figura 2.30) ou através de uma máquina de impregnação (Figura 2.31) e depois colocada e pressionada sobre a camada de resina de impregnação. Para exercer pressão sobre as fibras para as impregnar e expulsar todo o ar que fique entre estas e a superfície de betão poderá ser utilizado um rolo (de um material não absorvente), este deverá ser utilizado apenas na direcção paralela à direcção das fibras. Na aplicação de tecidos, o rolo deverá ser inicialmente utilizado na direcção do desenvolvimento do FRP (principal), de extremidade a extremidade, e apenas depois na direcção perpendicular a essa.



Figura 4.32 – Impregnação manual (a) e impregnação com máquina de impregnação (b).

Salienta-se que a utilização de uma máquina de impregnação permite uma potencialmente melhor impregnação das fibras e uma espessura final do compósito de FRP mais uniforme, possibilitando assim, numa maior garantia de qualidade.

Em geral não é necessária a aplicação de sistemas de pressão exteriores para manter o compósito de FRP na sua posição durante a cura.

Mais uma vez, é importante ter consciente na aplicação do compósito que, desvios superiores a 5° em relação ao alinhamento previsto em projecto, afecta significativamente o desempenho do reforço (Yang et al., 2001).

### **( iii ) Aplicação de várias camadas de mantas/tecidos**

A este procedimento aplica-se na íntegra o descrito para o caso anterior de *Impregnação no Substrato*.

### **( iv ) Execução de sobreposições/emendas de compósito de FRP , ( v ) Execução da amarração do compósito de FRP e ( vi ) Processo de cura**

A estes procedimentos aplica-se na íntegra o descrito para os *Laminados de FRP* no Ponto 4.6.1.

**( vii ) Execução de zonas de amostragem e de provetes de Compósito de FRP**

A este procedimento aplica-se na íntegra o descrito para o caso anterior de *Impregnação no Substrato*.

**4.7 Reparação de Não Conformidades**

Este ponto dedicado à reparação de não conformidades, decorrentes de eventuais falhas na aplicação do reforço, é função do resultado da inspecção ao sistema aplicado. Consoante as não conformidades detectadas especifica-se aquelas que são consideradas como admissíveis e aquelas que requerem intervenção e nesse caso indica-se também o seu método de reparação.

Salienta-se que este ponto resulta da inspecção ao sistema aplicado que é objecto do Capítulo 5 dedicado ao controlo de qualidade.

A necessidade de reparação e, dentro desta, o método de a fazer depende do tamanho, tipo e extensão da não conformidade.

A seguinte proposta para a divisão entre não conformidades e o seu tratamento são baseados na proposta do NCHRP Report 514, 2004.

**( i ) Não conformidades que não necessitam de reparação**

Pequenos vazios e irregularidades na superfície não superiores a 7 mm de diâmetro podem ser considerados como admissíveis, não requerendo nenhuma acção correctiva, a menos que, se localizem nas extremidades ou surjam com uma frequência superior a 5 numa área de 1 m<sup>2</sup>.

**( ii ) Injecção de resina epoxídica em vazios de pequena dimensão**

Vazios com tamanho entre 7 mm e 30 mm de diâmetro devem ser reparados usando injecção de resina a baixa pressão, desde que sejam vazios pontuais e que não se estendam por toda a espessura do compósito de FRP em aplicações de múltiplas camadas. Se se suspeitar de delaminação do compósito de FRP devido à operação de injecção, esta deve ser de imediato interrompida e a área em causa reparada como uma reparação de pequenas anomalias.

**( iii ) Reparação de pequenas anomalias**

São consideradas pequenas anomalias, não conformidades cuja dimensão se situa entre 30 e 150 mm de diâmetro e que não existam com uma frequência superior a 5 por cada 10 m de extensão de compósito de FRP. Estas pequenas anomalias podem ser fendilhação, cortes, enrugamentos, etc.

Neste caso, toda a área afectada, conjuntamente com a área circundante em pelo menos 25 mm, deve ser cuidadosamente removida. Após a remoção, a área deve ser limpa e completamente seca para ser remendada com o mesmo tipo compósito de FRP. É importante que a área a emendar se estenda em pelo menos 25 mm para cada lado da área removida e, se for caso, que respeite os comprimentos de amarração.

#### **( iv ) Substituição de não conformidades de grande dimensão**

São consideradas não conformidades de grande dimensão, aquelas cuja extensão é superior a 150 mm de diâmetro. Estas são muitas vezes uma indicação de descolamento significativo entre camadas ou da existência de água aprisionada no interior da resina. Nestes casos é importante descobrir a razão da não conformidade e tratá-la.

Face a estas não conformidades, toda a área afectada, conjuntamente com a área circundante em pelo menos 25 mm, deve ser removida. No caso de se tratar de um compósito de FRP com várias camadas, a remoção deverá ser progressiva através destas, até se atingir a camada onde se encontra a não conformidade. No limite, se o defeito se estender até ao contacto com o substrato de betão, toda a espessura de compósito de FRP conjuntamente com o primário devem ser removidos. De seguida procede-se à aplicação de um novo sistema compósito de FRP. É, mais uma vez, importante que se respeitem os comprimentos de amarração na execução do novo compósito de FRP.

### **4.8 Protecção do Compósito de FRP**

É muitas vezes prevista em projecto a execução de uma protecção ao compósito de FRP.

Esta protecção pode ser necessária por diversas razões. Pode ser considerado prudente, em certas situações, proteger o compósito de FRP de agressões físicas que poderão ocorrer devido ao descuido humano ou mesmo a actos de vandalismo. Também a manutenção das temperaturas máximas atingidas no compósito de FRP em serviço ou durante um determinado período de tempo, na eventualidade da acção acidente fogo, poderão conduzir à aplicação de uma protecção nesse sentido. Por outro lado, e em sequência do estudo feito relativamente ao comportamento a longo prazo destes sistemas, se a estrutura reforçada estiver exposta a um ambiente muito agressivo pode ser considerado sensato tomar as devidas acções de protecção. Por fim, imposições arquitectónicas podem obrigar, não bem a uma protecção mas sim a um revestimento do compósito de FRP que também será aqui tratado.

No parágrafo anterior foram abordadas as razões que levam a executar uma protecção com carácter definitivo, denominada de protecção permanente. Existe ainda uma protecção com tempo limitado, apenas com o intuito de proteger o compósito de FRP durante a sua cura, denominada de protecção temporária (ACI 440.2R-02, 2002; fib Bulletin nº14, 2001; CNR-DT 200, 2005).

A protecção temporária é recomendada para proteger o compósito de FRP na fase em que o seu adesivo/resina de impregnação está em processo de cura. Esta pretende evitar o contacto directo da humidade, de poeiras, da luz e calor excessivos, ou mesmo de alguma agressão mecânica que possam induzir em uma polimerização inadequada da resina epoxídica (ACI 440.2R-02, 2002).

#### **4.8.1 Tipos de Protecção**

O NCHRP Report 514, 2004 indica que de uma forma geral, a protecção deve ser permeável ao vapor de água (mas não à água) para permitir que o sistema “respire”, prevenindo assim, eventuais danos causados pela pressão deste. A protecção também deve apresentar um comportamento flexível e ser quimicamente compatível com o sistema compósito de FRP.

Frisa-se que antes do início da aplicação da protecção, a superfície do compósito de FRP já tenha sido inspeccionada quanto à existência de não conformidades, pois após a sua aplicação o compósito de FRP ficará encoberto.

A superfície do compósito de FRP pode ter de ser preparada para receber a protecção, é importante ter consciência que não se podem utilizar solventes para a sua limpeza a menos que explicitamente permitido pelo fabricante do sistema, e que se for necessário efectuar uma limpeza abrasiva, a pressão deverá ser limitada, para evitar que se danifique as fibras.

O NCHRP Report 514, 2004 também indica que o revestimento deve ser aplicado sobre o sistema compósito de FRP antes de a resina endurecer.

De seguida especifica-se os tipos de protecção conforme o seu âmbito.

##### **( i ) Agressão ambiental**

No caso de situações em que se pretenda proteger o compósito de FRP de agressões ambientais, onde se incluem as elevadas temperaturas em serviço, são propostas duas possibilidades consoante o nível de agressão.

Para as situações mais correntes, após uma limpeza final do compósito de FRP (com o produto especificado pelo fornecedor), aplica-se uma protecção por meio de uma pintura acrílica que evita a exposição directa do sistema compósito de FRP ao ambiente.

Para situações mais exigentes, é indicado o tratamento superficial do compósito de FRP com uma pintura da família das resinas epoxídicas, pulverizada com areia de quartzo, de modo a proporcionar aderência à camada final de um reboco ou argamassa de recobrimento, com a espessura adequada para o caso em estudo. Segundo o NCHRP Report 514, 2004, o revestimento a empregar poderá ser uma argamassa

polimérica ou cimentícia, ou ainda, uma argamassa que recorra a ambos os ligantes. A carga da argamassa deverá ser uma areia de sílica entre os peneiros N.º. 40 (0,42 mm) e N.º. 6 (3,36 mm).

### ( ii ) Agressão física

De modo a prevenir e/ou reduzir os efeitos negativos de eventuais agressões físicas (vandalismo, choque, explosão) é comum definirem-se sistemas adicionais de protecção (estruturais ou não) ajustados à importância de cada obra de reforço.

### ( iii ) Acção acidente fogo

No caso concreto da protecção ao fogo, o documento Italiano CNR-DT 200 (2005), indica que podem ser adoptadas duas soluções: o uso de painéis intumescentes ou a aplicação de um reboco de protecção. Em ambos os casos, os fabricantes dos painéis/rebocos devem indicar o grau de protecção destes em função da sua espessura. A mesma publicação também indica que os painéis intumescentes poderão ser aplicados directamente sobre o sistema compósito de FRP, tendo-se o cuidado de que as fibras não sejam cortadas durante a instalação.

Dependendo do tempo desejado para a resistência ao fogo, salientam-se as propostas de revestimento directo com cartões de gesso (Rutz, 1995) ou com painéis de sílica do tipo PROMAT (Wendel, 1995) e, ainda, as aplicações de qualquer um destes materiais sob a forma de tectos falsos suspensos pelas lajes de pavimento (Figura 4.33). Nestas situações, a espessura de dimensionamento dos materiais dependerá do recobrimento da armadura interna no betão existente, da percentagem de reforço a executar e da extensão superficial colada com compósito de FRP a proteger da acção acidente fogo.

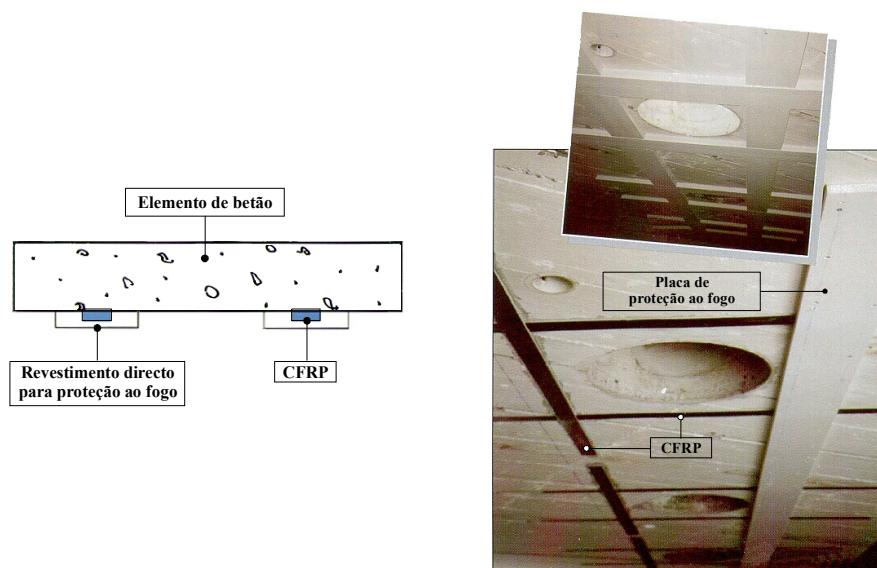


Figura 4.33 – Protecção adicional ao fogo por revestimento directo dos Laminados de FRP com cartões de gesso ou placas de sílica (S&P, 1998).

Em qualquer dos casos, as consequências da rotura do reforço devem ser sempre encaradas como uma situação de risco possível. Embora não dentro do âmbito do presente ponto indica-se que geralmente, exige-se que a estrutura, com a ruína do reforço, possa suportar a combinação de acções estabelecida nesta situação (coeficiente de segurança maior que a unidade), isto é, resista às acções permanentes e a uma percentagem das acções variáveis. Desde o início da década de setenta que se recomenda que o reforço posterior de estruturas existentes não exceda mais de 50% da sua resistência actual e que, no caso da ruína accidental do reforço, a estrutura remanescente tenha uma segurança residual superior ou igual a 1.2 para se evitar o colapso geral (Meier, 1997).

#### **( iv ) Imposições arquitectónicas**

Por fim, as imposições arquitectónicas definidas em projecto podem condicionar a escolha da protecção, se esta for necessária, ou obrigar simplesmente à execução de um revestimento adicional como uma pintura.

De uma forma geral, e mesmo que não imposto em projecto, é razoável procurar que a protecção exiba uma aparência final que, tanto quanto possível, tente igualar a cor e a textura do betão adjacente.

#### **4.8.2 Inspeção à Protecção Aplicada**

Após a aplicação da protecção deve ser levada a cabo uma inspecção para se aferir quanto à existência de não conformidades na sua superfície.

As não conformidades que mais comumente são observadas em um revestimento de protecção são a fendilhação de pequena dimensão, o empolamento e o destacamento (Figura 2.32).



Figura 2.32 – Empolamento e destacamento do revestimento de protecção (Kaiser et al., 2001).

Se se verificar a presença de fendilhação no revestimento de protecção, a área afectada deve ser levemente areada e aplicado um novo revestimento, numa extensão que ultrapasse, no mínimo, 25 mm para cada lado da zona não conforme.

Na eventualidade do revestimento de protecção apresentar sinais de empolamento, toda a área empolada, conjuntamente com a área circundante em pelo menos 300 mm, deverá ser cuidadosamente removida. Após a remoção, a área deve ser limpa e completamente seca para a aplicação de um novo revestimento.

Finalmente, se a superfície apresentar sinais de destacamento, todo o revestimento deverá ser cuidadosamente removido, a superfície levemente areada, limpa e completamente seca para a aplicação do novo revestimento.

## 4.9 Considerações Finais

Ao longo deste capítulo foram apresentados e discutidos os procedimentos de construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP pré-fabricados e sistemas compósitos de FRP curados *“in situ”*.

A informação constante neste capítulo servirá de base à redacção das especificações técnicas de execução a incluir no caderno de encargos e servirá também de “manual” para os aplicadores do sistema de reforço e para a fiscalização que o valida.

A correcta construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP deve-se cumprir numa sequência de procedimentos que englobam, não só a aplicação propriamente dita do compósito de FRP, mas também o controlo de vários pressupostos de cumprimento indispensável. Aqui evidenciam-se oito etapas para a construção de um reforço: análise de projecto; recepção e armazenamento; inspecção e reparação do substrato; preparação e verificação da superfície; manuseamento de resinas epoxídicas; aplicação do compósito de FRP; reparação de não conformidades; e protecção do compósito de FRP.

Do exposto no presente capítulo, salienta-se:

- A construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP engloba, para além do procedimento de colagem do compósito, outras tarefas de cumprimento indispensável como a preparação e verificação da superfície;
- É fundamental para o sucesso da operação de reforço que o substrato se apresente em boas condições mecânicas e de conservação e que a superfície cumpra com os requisitos de rugosidade e limpeza impostos;
- O controlo das condições higrotérmicas no momento da aplicação e durante a cura é determinante para o sucesso da operação de reforço;
- A recolha de provetes dos materiais “fabricados” em obra, assim como, a execução de zonas de amostragem deverão ser encarados como procedimentos obrigatórios na construção de um reforço com estes sistemas;



- A protecção do sistema compósito de FRP aplicado deverá ser encarada (na generalidade das situações) como mais uma etapa integrante do reforço, no sentido de se controlar a temperatura máxima atingida no compósito de FRP e/ou de o proteger de agressões mecânicas.



## CAPÍTULO 5

### CONTROLO DE QUALIDADE

Este capítulo é dedicado ao controlo de qualidade da construção de um reforço numa estrutura de betão armado, através da técnica de colagem exterior com sistemas compósitos de FRP.

O objectivo primário deste controlo de qualidade é assegurar que o processo de reforço decorre de acordo com o exigido no projecto (em termos de materiais e procedimentos de construção) e respeite todas as normas e regulamentos aplicáveis. Visando-se que, desta forma, no final da sua execução, o reforço aplicado terá o desempenho desejado pelo projectista.

O controlo de qualidade está dividido em duas fases. A fase de execução do reforço e a fase pós-execução do reforço.

A primeira fase, que como o seu nome indica decorre durante a execução do reforço, intervém no controlo dos procedimentos de construção. Está presente em todas as etapas da construção do reforço e incide sobretudo nos procedimentos que são considerados como críticos para seu o desempenho.

Esta fase inicia-se pelo controlo das premissas para a execução do reforço, ou seja, pela análise do projecto e pela aprovação das empresas intervenientes e dos materiais adoptados. Passando, de seguida, a intervir nos procedimentos de construção do reforço. Aqui, os pontos considerados como críticos aparecem na preparação do substrato e na aplicação do compósito de FRP, sendo dado especial destaque ao manuseamento da resina.

A segunda fase decorre após a execução do reforço, onde o controlo de qualidade obriga à inspecção do sistema de compósito de FRP aplicado. Esta inspecção inclui a inspecção visual e a realização de ensaios não destrutivos e semi-destrutivos no sentido de se detectar não conformidades que poderão pôr em causa a eficiência durante o seu período de serviço.

Após a aceitação da obra, em casos especiais (como o reforço de pontes), poderá ser exigida uma terceira fase do controlo de qualidade, a inspecção e a monitorização em serviço (Silva, 2007). No entanto, este trabalho não pretende incidir nessa fase.

Ao longo dos procedimentos de controlo de qualidade vão-se apresentando listas de verificação constituídas pelos “pontos-chave” a serem verificados/cumpridos. Estas listas têm o intuito de facilitar e sistematizar a aplicação do controlo de qualidade em obra.

Como todas as obras têm as suas particularidades, o controlo de qualidade deve ser ajustado às características e necessidades individuais de cada uma.

## **5.1 Fase de Execução do Reforço**

Na fase de execução do reforço o controlo de qualidade actua na verificação de uma série de procedimentos e pressupostos considerados como críticos na execução do reforço e consequente no desempenho deste em serviço.

Este iniciar-se-á com a verificação das bases para o processo de reforço como a adequabilidade do projecto, a qualificação da mão-de-obra interveniente e a certificação dos materiais a utilizar. De seguida, intervém no controlo das condições do substrato e da superfície de colagem obrigando estes a cumprir determinados requisitos. Por fim, o controlo de qualidade da execução, propriamente dita, do reforço preocupa-se não só, mas mais incisivamente, com o correcto manuseamento das resinas.

### **5.1.1 Análise do Projecto**

O projecto deve ser verificado quanto à existência de erros, omissões, indefinições ou inconsistências e ainda ser confrontado com as limitações do construtor e condicionantes do local, tanto relativas à execução do reforço como a inspecções e operações de manutenção em serviço. Nesta fase é já obrigatório o conhecimento dos ensaios de controlo de qualidade a realizar, assim como, dos resultados a obter.

Também nesta etapa de análise do projecto é fundamental já estar discutida e prevista a integração e cumprimento de todos os regulamentos relativos à segurança dos trabalhadores na execução dos trabalhos e ao impacte ambiental.

Tabela 4.1 – Controlo de Qualidade - Análise do Projecto

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. O projecto encontra-se completo com todas as suas peças escritas e peças desenhadas?			
2. O projecto foi analisado quanto à existência de erros, omissões, inconsistências e/ou ambiguidades?  Na sua existência, estas foram resolvidas ou esclarecidas?			
3. O projecto foi analisado quanto à sua compatibilidade com a envolvente física do local da obra e com os meios disponibilizados pelo construtor?  Na eventualidade de alguma incompatibilidade, estas encontra-se resolvida?			
4. As tolerâncias admitidas foram analisadas?			
5. As características requeridas para os materiais encontram-se devidamente especificadas?			
6. Os procedimentos de construção contemplam os seguintes pontos:  Armazenamento, manuseamento e aplicação dos materiais do Sistema compósito de FRP?  Procedimentos de controlo de qualidade?			
7. Existe um Plano de Segurança e de Gestão Ambiental que cumpre com todos os regulamentos vigentes?			
8. Foi verificada a acessibilidade para manutenção, inspecção e eventual reparação durante o período de serviço da estrutura?			

N/A – Não Avaliado

### 5.1.2 Qualificação das Empresas

Como a construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP tem uma importante componente de mão-de-obra, o sucesso desta operação passa pela qualificação dos trabalhadores que a executam. É então evidente, que a adequabilidade da sua experiência e da sua formação à complexidade da operação de reforço, sejam alvos do controlo de qualidade.

A competência deve ser demonstrada através da entrega de certificados de formação ou atestando a sua experiência. Esta última através da entrega de documentos comprovativos da anterior execução de obras de reforço utilizando estes sistemas.

Frisa-se que a necessidade de adequada formação não se esgota apenas nas questões técnicas, sendo que também é exigido o conhecimento das regras de segurança, higiene e saúde. Devendo todos os

intervenientes estar instruídos quanto aos riscos a que estão sujeitos e às medidas de prevenção a adoptar. O cumprimento destas regras obriga, obviamente, à existência de equipamentos de protecção, o que também deverá ser verificado.

Tabela 4.2 – Controlo de Qualidade - Qualificação das Empresas

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO			
	SIM	NÃO	N/A
1. As empresas apresentam recursos humanos e materiais adequados à complexidade técnica do projecto e ao planeamento temporal previsto?			
Foram entregues os certificados de formação?			
Foram entregues documentos comprovativos da experiência da mão-de-obra?			
2. O staff está devidamente informado relativamente às regras de segurança e ao modo de actuação em caso de acidente?			
3. Existe todo o equipamento de protecção necessário?			

N/A – Não Avaliado

### 5.1.3 Inspecção dos Materiais

O controlo de qualidade dos materiais é feito em dois níveis.

O primeiro, na aceitação dos materiais, rejeitando aqueles cuja integridade tenha sido comprometida e os que não sejam acompanhados pelos comprovativos das suas características e certificados de qualidade, e o segundo, na manutenção das suas propriedades durante a sua permanência em obra, controlando-se as condições de armazenamento.

#### 5.1.3.1 Recepção

Os constituintes do sistema compósito de FRP devem ser acompanhados pelas fichas técnicas onde se identifica o produto, se discriminam as suas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade e se especificam as condições de manuseamento, transporte e armazenamento. Também devem ser sempre acompanhados por toda a informação necessária relativa à segurança, higiene e saúde dos trabalhadores, assim como, ao impacte ambiental.

As propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade indicadas nas fichas técnicas devem ser corroboradas por um laboratório independente que seja supervisionado por uma instituição certificada, sendo que os documentos por ele emitidos também devem ser entregues. Essas mesmas propriedades devem ser contrapostas com as especificações requeridas no projecto para que se verifique a sua conformidade.

Nos casos em que os fornecedores não possuam a comprovação das propriedades reclamadas, por parte de um laboratório independente, poderá, como alternativa, ser exigida a realização de ensaios para o seu reconhecimento.

É importante que na sua recepção, cada constituinte seja sujeito a uma inspecção visual, no sentido de se verificar o seu estado e serem despistadas irregularidades devidas, por exemplo, a um transporte inadequado. A validade dos componentes das resinas também deve ser verificada quanto à sua congruência com a planificação temporal dos trabalhos da obra.

O controlo de qualidade obriga ainda a que o fabricante dos sistemas compósitos de FRP seja certificado.

Tabela 4.3 – Controlo de Qualidade - Recepção dos Materiais

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. Os materiais foram entregues com as suas Fichas Técnicas e com toda a informação relativa à Segurança e à Gestão Ambiental?			
As Fichas Técnicas indicam as propriedades mecânicas, físicas e químicas exigidas?			
As Fichas Técnicas fornecem informação relativa ao manuseamento, transporte e armazenamento?			
Foi fornecida toda a informação relativa segurança, higiene e saúde e impacte ambiental?			
2. Foi entregue um relatório emitido por um laboratório independente, devidamente certificado, a atestar as propriedades reclamadas nas Fichas Técnicas?			
3. Os Laminados de FRP e/ou as Mantas/Tecidos não apresentam qualquer tipo de dano e encontram-se em condições limpas?			
4. A cor das fibras constituintes das Mantas/Tecidos é a mesma do tipo de fibra especificada?			
5. As embalagens dos componentes das resinas encontram-se fechadas, devidamente seladas e sem quaisquer sinais de violação?			
6. As embalagens das resinas estão devidamente rotuladas com o nome, função, <i>shelf time</i> e número de lote do produto, assim como, com o nome e contacto do fabricante?			
7. O <i>shelf time</i> das resinas é consistente com o planeamento temporal previsto para a obra?			
8. Foi entregue o comprovativo da certificação da empresa fabricante do sistema compósito de FRP?			

N/A – Não Avaliado

### 5.1.3.2 Conservação em Obra

É fundamental, para a manutenção das propriedades dos materiais, que estes sejam devidamente armazenados durante o tempo que medeia entre a sua recepção e a sua aplicação. As condições de armazenagem aconselhadas e especificadas pelos fabricantes, assim como, as indicados no projecto devem ser respeitadas, com especial atenção para aquelas que são referentes às resinas que como se sabe são bastante sensíveis aos efeitos higrotérmicos.

Se durante este período de tempo se suspeitar que algum componente do sistema compósito de FRP esteve sujeito a condições diferentes do especificado, deve ser rejeitado e eliminado de acordo com o estipulado na gestão ambiental para o efeito.

Tabela 4.4 – Controlo de Qualidade - Conservação em Obra

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. O local de armazenamento é coberto (protegido do sol e de fontes de calor), fresco e seco?			
2. A temperatura e a humidade encontram-se dentro dos limites especificados?			
3. O material é armazenado nas suas embalagens originais devidamente seladas?			
4. Os componentes das resinas (resina e endurecedor) foram armazenados separadamente?			

N/A – Não Avaliado

### 5.1.4 Preparação do Substrato de Betão

Como já referido em vários pontos deste manual, o estado do substrato tanto em termos de conservação como de resistência e a geometria da superfície são decisivos para o melhor ou pior comportamento do reforço. Desta forma, é óbvia a sua inclusão neste controlo de qualidade.

#### 5.1.4.1 Inspeção do substrato

O substrato de betão destinado a receber o compósito de FRP deve ser verificado quanto ao seu estado de conservação e à sua resistência à tracção. Para tal prevê-se a execução, para além da inspecção visual, de ensaios.

A quantidade e a frequência com que se realizarão os ensaios dependerão da complexidade e da dimensão da obra.



É proposto que a avaliação da resistência à tracção superficial seja efectuada através do ensaio de *pull-off*. Este ensaio será abordado mais detalhadamente no ponto 5.2.2.2 deste capítulo.

Como já enunciado no capítulo anterior, por vários motivos, sendo que o fundamental é o perigo de destacamento do recobrimento que inviabilizaria o reforço, o compósito de FRP não deve ser aplicado se as armaduras no interior do elemento a reforçar estiverem corroídas ou se existir a possibilidade de virem a corroer. O estado de corrosão pode ser avaliado, segundo o fib Bulletin nº14, 2001, pela profundidade de carbonatação do betão e pelo nível de concentração de cloretos, sendo que ainda existem outros métodos menos expeditos como a medição do potencial eléctrico da armadura e a medição da resistividade eléctrica do betão.

Por razões relacionadas com a durabilidade e comportamento monolítico do substrato de betão, assim como, com a transferência de esforços entre este e o compósito de FRP, também se controla, limitando a valores considerados como seguros, tanto a espessura do recobrimento como a largura das fendas.

Caso se verifique o incumprimento de algum destes requisitos deve-se proceder à normalização da situação através de reparações específicas. Após as quais é necessário levar a cabo uma reavaliação a fim de atestar o seu sucesso. Os materiais de reparação utilizados e a sua ligação ao betão existente devem ser naturalmente sujeitos às mesmas exigências do restante substrato.

Tabela 4.5 – Controlo de Qualidade - Inspeção do Substrato

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. A superfície apresenta-se visualmente em boas condições gerais, sem armaduras à vista ou betão degradado e solto? Se não, a situação foi normalizada?			
2. Os resultados dos ensaios de <i>pull-off</i> são superiores a 1.5 MPa ou ao previsto no projecto?			
3. A profundidade de carbonatação é inferior ao admitido pelo projectista? Se não, a situação foi normalizada?			
4. A concentração de cloretos é inferior a 0,3%? Se não, a situação foi normalizada?			
5. A espessura do recobrimento é superior a 2,5 cm [1] (ou ao requerido em projecto)?			
6. As fendas com mais de 0,2 mm [1] (ou ao requerido em projecto) foram injectadas?			

Tabela 4.5 – Controlo de Qualidade - Inspeção do Substrato (cont.)

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO			
	SIM	NÃO	N/A
7. Todas as obstruções, como objectos parcialmente embebidos no substrato, foram removidas?			
8. O resultado do ensaio de <i>pull-off</i> à ligação entre o material de reparação e o substrato é superior a 1,5 MPa ou ao previsto no projecto?			

[1] depende da agressividade do ambiente em causa, como referência, poderá ser consultado o ACI 224.R, 2001.

N/A – Não Avaliado

#### 5.1.4.2 Verificação da Superfície

Após a inspeção e eventual reparação do substrato, e antes de se proceder à operação de colagem do compósito de FRP, é fundamental que se verifiquem e se cumpram requisitos impostos à superfície destinada a receber o sistema compósito de FRP. Estes requisitos prendem-se tanto com a geometria e rugosidade da superfície como com o estado de limpeza desta imediatamente antes da aplicação, que estando fora de determinados limites, comprometem o desempenho do reforço.

##### ( i ) Verificação do estado geral da superfície

Após a sua decapagem a superfície deve-se encontrar com os agregados expostos e com uma superfície limpa, sem manchas, gorduras, óleos, produtos da cura, revestimentos de tinta ou quaisquer outras substâncias que possam potencialmente afectar a ligação do compósito de FRP.

##### ( ii ) Verificação das arestas na superfície

Deve ser verificado se, nos casos em que o compósito de FRP acesse arestas, como frequentemente acontece no reforço ao corte em vigas, se essas arestas não apresentem um raio de curvatura inferior a 15 mm.

##### ( iii ) Inspeção do estado de limpeza da superfície

Imediatamente antes da aplicação da primeira camada de resina, seja ela de argamassa de regularização, primário, adesivo ou resina de impregnação, superfície deve-se encontrar limpa, sem poeiras nem partículas estranhas ou quaisquer outras substâncias que possam potencialmente ser inibidoras da colagem.

##### ( iv ) Inspeção da aplicação do primário

Se especificado pelo fabricante, ou se requerido no projecto, a aplicação do sistema compósito de FRP passará pela aplicação de uma camada de primário.

O manuseamento do primário, como resina epoxídica que é, deve estar sujeito ao controlo de qualidade disposto no ponto 5.1.5 do presente capítulo. O controlo de qualidade também requer que sejam executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de *pull-off*. Deve-se confirmar que estas zonas são executadas nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta e com a dimensão e na frequência dispostos no projecto. Os ensaios de *pull-off* serão abordados no ponto 5.2.2.2.

#### ( v ) Verificação da rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície de betão, destinada a receber o compósito de FRP deve ser controlada, não devendo ultrapassar os desvios indicados na Tabela 4.1 presente no Capítulo 4.

Se para se cumprir com os limites impostos for utilizada uma argamassa de regularização, o seu manuseamento deve ser sujeito ao controlo de qualidade disposto no ponto 5.1.5 do presente capítulo. O controlo de qualidade também requer que sejam executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios de *pull-off*. Deve-se confirmar que estas zonas são executadas nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta e com a dimensão e na frequência dispostos no projecto. Os ensaios de *pull-off* serão abordados no ponto 5.2.2.2.

Tabela 4.6 – Controlo de Qualidade - Verificação da Superfície

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. A leitada superficial do substrato foi removida através de decapagem?			
2. A superfície apresenta-se livre de manchas, sujidades, bolor, vegetação, óleos, partículas soltas, gorduras e quaisquer potenciais inibidores da ligação?			
3. Todas as saliências, como rebarbas de cofragem, foram removidas?			
4. As arestas foram suavizadas até um raio de 15mm?			
5. Todas as poeiras resultantes do processo de decapagem foram removidas?			
Na utilização de jacto de água foi permitido à superfície tempo suficiente para a sua secagem?			
6. Foi aplicada uma camada de primário sobre toda a superfície a reforçar?			
Foi feito o controlo de qualidade de cada mistura?			
Foram executadas as zona de amostragem estipuladas no projecto para a execução de ensaios de <i>pull-off</i> ?			

Tabela 4.6 – Controlo de Qualidade - Verificação da Superfície (cont.)

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
7. Todas as cavidades foram preenchidas com argamassa de regularização?			
Foi feito o controlo de qualidade de cada mistura?			
Foram executadas as zona de amostragem estipuladas no projecto para a execução de ensaios de <i>pull-off</i> ?			
8. Foram verificados os limites impostos para a rugosidade da superfície?			

N/A – Não Avaliado

### 5.1.5 Manuseamento de Resinas Epoxídicas

Embora o manuseamento da resina se integre dentro das operações de preparação do substrato e de aplicação do compósito de FRP, devido à sua importância, susceptibilidade e complexidade, as questões relacionadas com o seu controlo de qualidade são abordadas isoladamente.

Todas as misturas devem ser, separadamente, alvo do controlo de qualidade. É necessário que, em paralelo com todas as verificações que neste ponto se discriminam, se registre a data e hora da aplicação, o local onde foi aplicada, assim como, o número de lote da resina.

O controlo de qualidade obriga à verificação das condições higrotérmicas tanto do ambiente como do substrato, da correcta mistura dos componentes, do cumprimento do tempo de utilização e dos consumos e ainda do controlo das propriedades da resina em ensaios de laboratório.

Para a realização dos ensaios é naturalmente necessário proceder à recolha de provetes “*in situ*”.

Tabela 4.7 – Controlo de Qualidade - Manuseamento da Resina

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO	SIM	NÃO	N/A
1. Imediatamente antes da sua utilização foi verificado que as embalagens se encontravam devidamente seladas e dentro do seu <i>shelf time</i> ?			
2. No momento de aplicação da resina a temperatura da superfície encontrava-se superior ao ponto de orvalho mais 5 °C [1]?			
3. No momento de aplicação da resina a quantidade de água no substrato estava inferior a 10% [1]?			
4. A temperatura ambiente no momento de aplicação encontrava-se entre os 10 °C e os 35 °C [1]?			

Tabela 4.7 – Controlo de Qualidade - Manuseamento da Resina (cont.)

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
5.	A humidade relativa no momento de aplicação encontrava-se abaixo dos 80% [1]?			
6.	A mistura foi correctamente doseada de acordo com as especificações do fabricante?			
7.	Os <i>fillers</i> utilizados não são condutores de electricidade, não absorvem humidade, são capazes de suportar mais de 120 °C e têm uma dimensão máxima inferior 0,1 mm?			
8.	A resina foi misturada utilizando-se um misturador eléctrico com uma velocidade suficientemente baixa de forma a evitar a introdução de ar e durante um período superior a 3 minutos?			
9.	Após a mistura a resina encontrava-se homogénea sem laivos de cor diferente?			
10.	A viscosidade da resina mostra-se adequada, sem que se verifiquem escorrimentos excessivos?			
11.	Foi respeitado o tempo de utilização ( <i>pot life</i> ) da mistura?			
12.	O consumo de resina está de acordo com o especificado pelo fabricante?			
13.	Colheram-se amostras constituídas por 3 prismas de 16 x 4 x 4 cm e uma placa 30 x 15 x 0,4 cm, deixadas a curar em obra, para controlo das suas propriedades?			
14.	Foram registadas as temperaturas e humidade relativas do ambiente da local da obra durante a cura da resina?			

[1] – os valores podem variar consoante o fabricante.

N/A – Não Avaliado

### 5.1.6 Aplicação do Compósito de FRP

Nesta secção, o controlo de qualidade, foca os aspectos relacionados os procedimentos de aplicação do compósito de FRP, com a definição e execução das zonas de amostragem e ainda com a execução de provetes, no caso do sistema curado “*in situ*”.

#### ( i ) Verificação dos procedimentos de aplicação do compósito de FRP

O controlo de qualidade na aplicação do compósito de FRP compreende na verificação de uma série de pontos considerados como críticos para o sucesso da operação de reforço. Esses pontos prendem-se fundamentalmente com a integridade das fibras a aplicar, o estado de cura do primário no momento da

aplicação, a impregnação das fibras no caso dos sistemas curados *"in situ"*, com o processo de cura do sistema e com a verificação dos comprimentos de emenda e dos mecanismos exteriores de ancoragem (se existentes).

## ( ii ) Construção de zonas de amostragem e de provetes de compósito de FRP

Para o controlo de qualidade da aderência entre o substrato de betão e o compósito de FRP, devem ser executadas zonas de amostragem, em locais contíguos ao da aplicação do reforço, para a realização de ensaios semi-destrutivos (ensaio de *pull-off*). Deve-se confirmar que estas zonas sejam executadas nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta, com a dimensão e na frequência indicados no projecto. Os ensaios de *pull-off* serão abordados no ponto 5.2.2.2.

Na aplicação de um sistema curado *"in situ"*, com vista à avaliação das propriedades do compósito de FRP é necessário construir um provete em obra para a sua caracterização em laboratório. Durante a execução do provete deverá existir a preocupação de a fazer nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. Os provetes devem curar em obra nas mesmas condições do restante sistema.

Tabela 4.8 – Controlo de Qualidade - Aplicação do Compósito de FRP

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
1.	Os elementos a reforçar foram escorados?			
2.	Imediatamente antes da aplicação a manta/tecido ou o laminado de FRP não apresenta quaisquer danos devido ao manuseamento ou ao corte e está livre de qualquer tipo de sujidade?			
3.	O sistema foi aplicado entre 1,5 e 48 horas após a colocação do primário e quando este já não se encontrava pegajoso (verificado com o toque dos dedos)?			
4.	No caso do sistema curado <i>"in situ"</i> , as mantas/tecidos com uma gramagem superior a 400g/m <sup>2</sup> foram impregnadas recorrendo a uma máquina de impregnação?			
5.	Foi feito o controlo de qualidade de cada mistura?			
6.	No caso do sistema curado <i>"in situ"</i> , na aplicação de mantas o rolo foi utilizado unicamente na direcção das fibras e na aplicação de tecidos o rolo foi utilizado primeiro na direcção de desenvolvimento do tecido e apenas depois na direcção transversal a esta?			
7.	Nas locais de interrupção da manta/tecido na direcção das fibras, ou do laminado de FRP, foi feita uma sobreposição com um comprimento mínimo de 150 mm ou como especificado em projecto?			

Tabela 4.8 – Controlo de Qualidade - Aplicação do Compósito de FRP (cont.)

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
8.	O número máximo de camadas de compósito de FRP é inferior ou igual a 3 no caso de sistemas pré-fabricados e a 5 no caso de sistemas curados <i>"in situ"</i> ?			
9.	No caso do sistema curado <i>"in situ"</i> com impregnação na superfície de aplicação, foi utilizada para a camada intermédia de resina de impregnação uma quantidade superior em 20% da utilizada para uma camada única?			
10.	Foram executadas, em zonas contíguas às do reforço, zonas de amostragem com as dimensões especificadas no projecto para a realização os ensaios de aderência?			
11.	No caso do sistema curado <i>"in situ"</i> , foram executadas provetes de compósito de FRP com as dimensões especificadas no projecto e nas mesmas condições da aplicação?			
12.	Durante a aplicação e a cura do sistema não ocorreram vibrações no local?			
13.	Os mecanismos exteriores de fixação foram instalados de acordo com as condições estipuladas em projecto?			
14.	Foi implementada alguma protecção do compósito de FRP às condições ambientais agressivas (chuva, insolação, elevados gradientes térmicos) durante o período de cura?			

N/A – Não Avaliado

## 5.2 Fase Pós-execução do Reforço

Após a conclusão da execução do reforço, o controlo de qualidade obriga a uma inspecção e verificação de garantia de qualidade do sistema aplicado. Essa inspecção visa a detecção de eventuais não conformidades causadas por descuido humana ou por qualquer outro tipo de falha.

A inspecção consiste em uma inspecção visual a todo o sistema, na realização de ensaios não destrutivos (NDT) para a detecção de vazios no interior da junta colada e em ensaios semi-destrutivos (SDT) para a avaliação da resistência da ligação dos materiais com o substrato.

Os ensaios em laboratório, aos provetes recolhidos na fase de execução do reforço, complementam o controlo de qualidade. Embora a sua realização não seja discutida, frisa-se que os seus resultados são muito importantes para validar o reforço.

No final desta fase, todas as não conformidades identificadas devem ser reparadas de acordo com o especificado no Ponto 4.8 do Capítulo 4.

### 5.2.1 Inspeção Visual

Todo o sistema instalado deve ser alvo de uma inspeção visual, essa inspeção deverá decorrer passadas, pelo menos, 24 horas da execução do reforço. Esta deve ser cuidada e objectivar o despiste de não conformidades relacionadas com a geometria do reforço aplicado, verificando se está ou não de acordo com o projecto, e de não conformidades visíveis à superfície do compósito de FRP que façam prever uma redução na eficácia ou durabilidade do reforço.

Sempre que seja detectada alguma não conformidade, esta deve ser de imediato assinalada no local para posterior reparação.

#### ( i ) Não conformidades com o projecto

É necessário verificar se o compósito de FRP está aplicado como previsto no projecto, verificando-se a localização e o alinhamento do reforço, a sua largura e a sua espessura e ainda o seu número de camadas.

Essa verificação incidirá não só sobre a concordância da configuração do reforço com o projecto mas também na verificação do comprimento das sobreposições e, no caso de existirem, da correcta execução das amarrações mecânicas.

Tabela 4.9 – Controlo de Qualidade - Não Conformidades com o Projecto

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
1.	A localização do reforço na estrutura está de acordo com o projecto?			
2.	As características geométricas (largura/espessura) do compósito de FRP estão de acordo com o previsto em projecto?			
3.	O número de camadas está de acordo com o especificado em projecto?			
4.	O alinhamento do compósito de FRP aplicado não excede em 5° o previsto em projecto?			
5.	O comprimento das sobreposições respeita o estipulado em projecto?			
6.	Todas as amarrações previstas no projecto (comprimentos de ancoragem e/ou mecanismos exteriores de fixação) foram devidamente executadas?			
7.	Todas as Não Conformidades detectadas foram assinaladas?			

N/A – Não Avaliado



### ( ii ) Não conformidades na superfície do compósito de FRP

A superfície do compósito de FRP deve ser cuidadosamente inspeccionada no sentido de se detectarem não conformidades, fruto de alguma falha humana ou material, como a existência de fibras fracturadas, espessamentos, fibras encurvadas ou desalinhadas, cura irregular da resina, etc.

Na foto da Figura 5.1 apresentam-se o aspecto de algumas não conformidades que podem ser encontradas em sistemas curados *"in situ"*.



Ondulação transversal das fibras



Resina com pouca viscosidade

Figura 5.1 – Não conformidades em um compósito de FRP curado *"in situ"* (Kaiser et al., 2001).

Tabela 4.10 – Controlo de Qualidade - Não Conformidades na Superfície do Compósito de FRP

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO			
	SIM	NÃO	N/A
1. Todas as extremidades do compósito de FRP aplicado estão em bom estado sem se encontrarem partidas, danificadas ou descoladas?			
2. Não se observam quaisquer descontinuidades no compósito devido à fractura de fibras?			
3. O compósito de FRP não apresenta quaisquer zonas com resina não curada por completo (verificado ao toque dos dedos)?			
4. Nos sistemas curados <i>"in situ"</i> , não se verificam zonas com impregnação não uniforme, zonas com espessamentos ou com falta de resina?			
5. Nos sistemas curados <i>"in situ"</i> , não se visualizam fibras com pregas ou encurvadas?			
6. Todas as não conformidades detectadas foram assinaladas?			

N/A – Não Avaliado

### 5.2.2 Ensaios em Obra

É fundamental para a validação do processo de reforço que a interface de colagem entre o compósito de FRP e o substrato de betão, assim como, entre as várias camadas de compósitos de FRP (se existir mais que uma camada), seja avaliada tanto em termos de existência de vazios como do valor da aderência da

ligação. Para tal, devem ser realizados ensaios que permitam aferir qual o estado do reforço em relação a estes aspectos.

### 5.2.2.1 Ensaios Não Destrutivos (NDT)

O despiste da existência de vazios e de delaminações no interior do compósito de FRP, por dever ser efectuado em todo o reforço aplicado, apenas pode ser executada através de ensaios que não comprometam a integridade do sistema aplicado, ou seja, por ensaios não destrutivos.

São vários os ensaios que podem ser utilizados para alcançar esse fim. No entanto, à excepção do ensaio acústico por pancadas *tap test*, todos os ensaios requerem o uso de equipamento electrónico específico e um manuseamento algo complexo, que se traduzem em maiores custos. Por esse motivo o *tap test* é o ensaio mais amplamente utilizado, que quando devidamente executado por pessoal experiente, permite mapear de forma expedita os vazios que eventualmente existam.

#### (i) *Tap test*

Este ensaio é realizado recorrendo-se apenas à utilização de um material duro como uma barra de metal ou mesmo uma moeda (Figura 5.2). Através da aplicação de pancadas sucessivas sobre a superfície do compósito de FRP é possível identificar a existência de vazios pelo som surdo que se produz quando sob a superfície se encontra um. A eficácia deste ensaio depende bastante da experiência de quem o executa.

É evidente que quanto maior for a quantidade de pancadas por área maior será a probabilidade de se detectar vazios. No entanto, não é razoável exigir que se aplique um número de pancadas que possa inviabilizar a exequibilidade do ensaio, sendo considerado como suficiente uma frequência não seja inferior a uma batida por 0,1 m<sup>2</sup>.



Figura 5.2 – “Tap test” com uma moeda (Kaiser, et al., 2002).

**( ii ) *Impact-echo testing***

Este ensaio baseia-se no tempo de reflexão de uma onda sísmica emitida pelo aparelho (através de um impacto mecânico) sobre meio a testar. Através da comparação dos tempos de reflexão das distintas zonas consegue-se assinalar as descontinuidades, e como a velocidade das ondas é conhecida, é ainda possível conhecer qual a espessura da descontinuidade.

Na Figura 5.3 mostra-se o equipamento necessário à realização do ensaio.



Figura 5.3 – Equipamento de *impact-echo testing* (Maerz, 2003).

Este trata-se de um método perfeitamente capaz de detectar os vazios existentes no compósito de FRP aplicado (Maerz, 2003), no entanto, não deixa de ser moroso, sendo apenas aconselhável para a detecção pontual em zonas críticas.

**( iii ) Termografia por infra-vermelhos**

Este ensaio apenas pode ser executado quando o compósito de FRP aplicado já se encontra em equilíbrio térmico, ou seja, quando o processo de polimerização da resina esteja terminado (não gerando calor).

Através da imposição de uma alteração da temperatura da superfície do compósito de FRP, arrefecendo-a ou aquecendo-a, e com um sistema de infra-vermelhos consegue observar-se a evolução, ao longo do tempo, do consequente aquecimento ou arrefecimento, respectivamente. Os vazios são então detectados pela aparição de locais mais quentes ou mais frios que a restante superfície, denunciando assim, a existência e localização das referidas descontinuidades.

A termografia por infra-vermelhos apesar de apresentar algumas limitações no caso de compósitos de FRP com várias camadas (Brown et al., 2003) continua a ser recomendada.

Na Figura 5.4 mostra-se o equipamento utilizado na realização do ensaio.

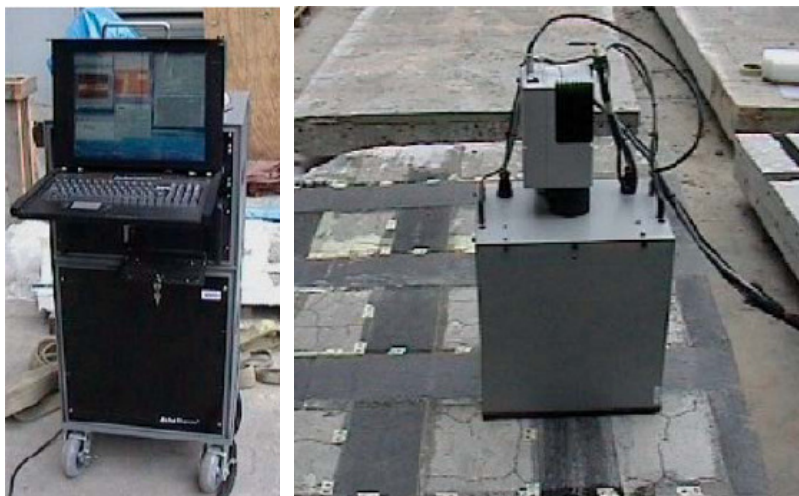


Figura 5.4 – Equipamento para o ensaio (NCHRP Report 564, 2006).

#### ( iv ) Ultra-sons

Este ensaio baseia-se na correlação existente entre a velocidade de propagação de ondas sonoras (ondas de alta-frequência) e as condições do substrato a ensaiar. A presença de um vazio faz com que a amplitude da onda se reduza significativamente e, por a onda ter de contornar o vazio, que os tempos de propagação sejam acentuadamente superiores.

Este método obriga a que a superfície a ensaiar se encontre lisa e requer mão-de-obra especializada para a sua execução. Segundo o fib Bulletin N°14, 2001, este método não é capaz de testar com sucesso as extremidades do compósito de FRP, assim como, as zonas com um raio de curvatura baixo, tendo portando estas limitações. Uma vez que demora bastante tempo a ser executada, apenas é fortemente aconselhado para zonas pontuais onde o reforço é crítico.

Tabela 4.10 – Controlo de Qualidade - Presença de Vazios

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO			
	SIM	NÃO	N/A
1. Foi executada o despiste quanto à existência de vazios/delaminações a todo o compósito de FRP instalado?			
2. Os vazios encontrados foram assinalados?			

N/A – Não Avaliado

### 5.2.2.2 Ensaios Semi-destrutivos (SDT)

O controlo de qualidade obriga à execução de Ensaios Semi-destrutivos para a avaliação da resistência da ligação (aderência) entre o substrato de betão e os sucessivos constituintes do sistema compósito de FRP.

Pela sua facilidade de execução e versatilidade o ensaio de arrancamento por tracção, *pull-off*, é o ensaio aqui tomado como referência. Embora também se faça uma alusão a outros ensaios, que não sendo objecto deste controlo de qualidade, exibem vantagens que pelo seu interesse poderão vir a justificar a sua futura integração.

Os ensaios devem ser exclusivamente realizados nas zonas de amostragem executadas para o efeito e decorrer 3 e/ou 7 dias após a execução do reforço.

#### ( i ) Ensaio de arrancamento por tracção (*Pull-off*)

Este ensaio consiste na medição da força de tracção necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas (secção circular com diâmetro de 50mm) previamente coladas à superfície de betão com uma cola epoxídica. Este ensaio deve ser realizado de acordo com a Norma EN 1542 e com as especificações do LNEC FE-Pa36 (Juvandes et al., 2007).

A Figura 5.5 ilustra o faseamento do ensaio que se inicia com a execução de um pré-caroteamento de 15 mm de profundidade no local a ensaiar com o objectivo de circunscrever a tensão de aderência à área real da colagem. O passo seguinte é a colagem da pastilha e por fim o arrancamento da pastilha utilizando-se para o efeito o equipamento apropriado.

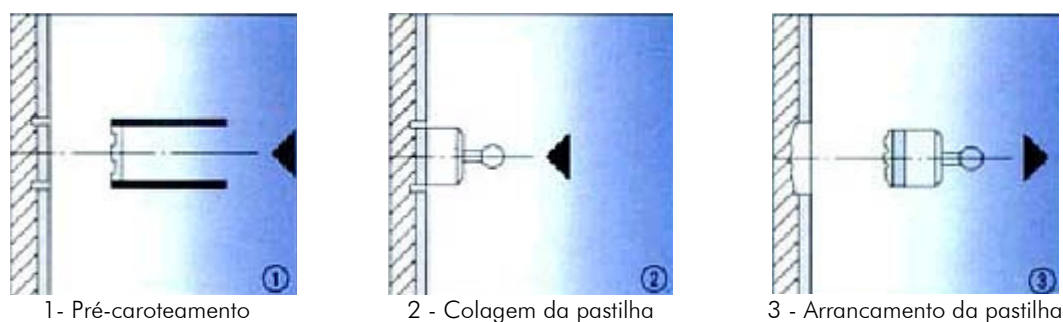


Figura 5.5 – Procedimentos do ensaio de “pull-off” (ROGERTEC, 2006).

O valor da tensão de tracção ( $f_{ct,p}$ ), que neste contexto admite-se igual à tensão de aderência, obtém-se dividindo o esforço de tracção na rotura pela secção da pastilha.

Na Figura 5.6, ilustra-se o aspecto geral do ensaio de *pull-off* e um caso de avaliação em obra da aderência na junta betão-resina-compósito de FRP curado “*in situ*”.

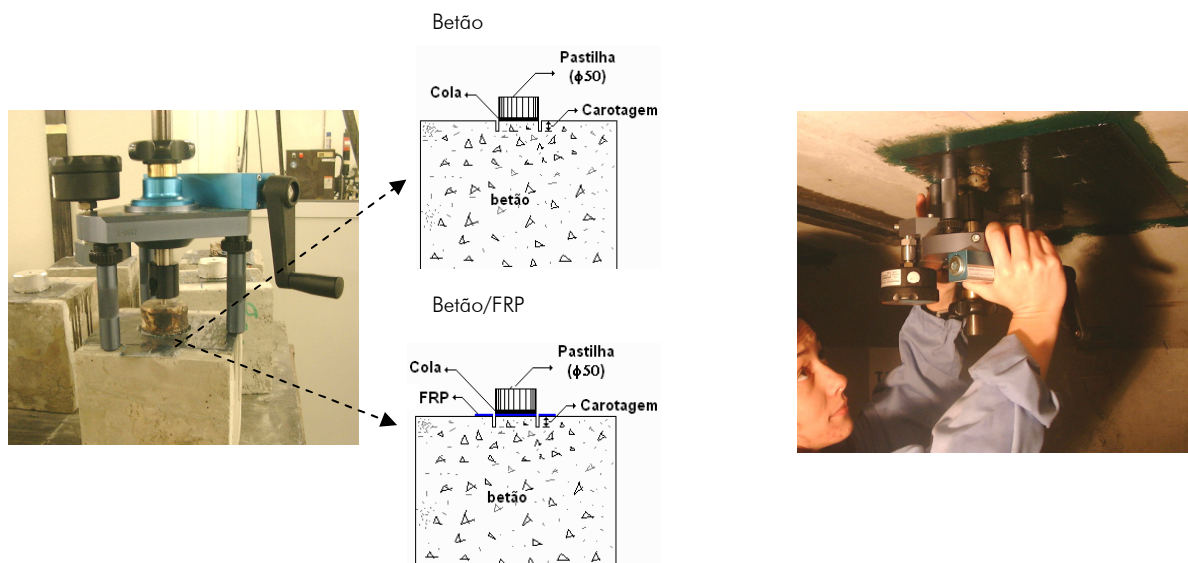
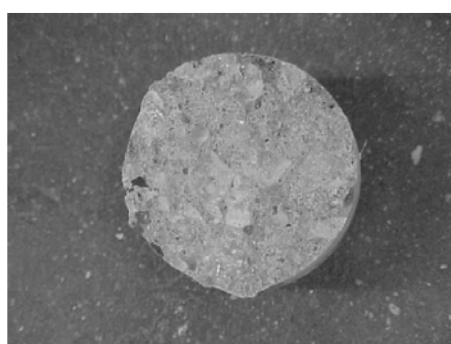


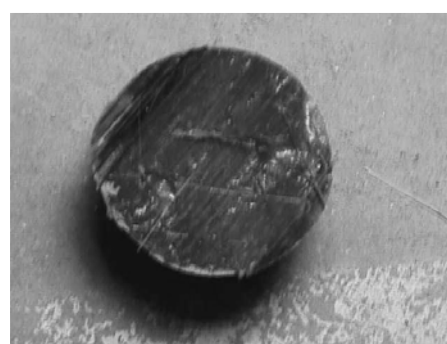
Figura 5.6 – Ensaio de *Pull-off*.

Os modos de ruína podem ocorrer por corte integral ao longo de uma superfície de betão, por rotura do adesivo (ruína coesiva) ou por destacamento na interface de ligação dos materiais (ruína adesiva). Se a ruína se manifestar no betão ou no adesivo, determina-se a resistência à tracção dos mesmos, e este valor é um limite mínimo para a resistência da ligação. Se a ruína ocorrer, uma parte na interface de ligação e a outra no betão ou no adesivo, significa que a resistência à tracção dos dois é semelhante e o valor determinado é considerado como um valor médio da aderência.

Na Figura 5.7 podem-se ver dois tipos de rotura possíveis, sendo que, como referido, o caso da foto (b) evidencia alguma não conformidade como má preparação da superfície ou mau desempenho da resina.



(a) Rotura no substrato de betão



(b) Rotura na resina

Figura 5.7 – Modos de rotura

É recomendado que as zonas ensaiadas sejam emendadas.

Este método, embora não exibindo uma precisão elevada, uma vez que o seu resultado pode ser facilmente afectado pelas variações locais das propriedades do betão, assim como, pela presença de inertes com maior dimensão, constitui ainda assim, um método eficaz e expedito de avaliação da aderência. Com

consciência da precisão deste ensaio é obrigatório que se proceda à execução de pelo menos 3 ensaios para através da sua média se obter o valor da tensão de aderência.

Segundo o CNR-DT 200, 2005, a aplicação do compósito de FRP poderá ser considerada como aceitável se pelo menos 80% dos ensaios apresentarem valores não inferiores a 0,9-1,2 MPa desde que a rotura ocorra no substrato de betão. Mas, como já referido, a tensão de rotura estipulada no projecto deve ser sempre preponderante.

Para cada ensaio é necessário registar a informação referente não só ao ensaio como às condições em que a pastilha é colada e em que o ensaio é realizado.

#### ( ii ) Ensaio de arrancamento por corte (*shear test*)

Este ensaio, cuja principal vantagem é submeter a interface de ligação ao “corte puro”, apenas é possível para os sistemas pré-fabricados. A sua realização implica a aplicação de um laminado de FRP sobre uma extremidade do elemento de betão e estendendo-se a partir desta para fora (Figura 5.7). Sobre a parte do laminado de FRP que estende para fora do betão é então exercida uma força até à rotura entre este e o betão.

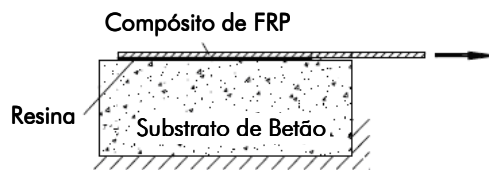


Figura 5.7 – Esquema do ensaio de arrancamento por corte.

Segundo o CNR-DT 200, 2005, o processo de reforço poderá ser considerado como aceitável se pelo menos 80% dos ensaios apresentarem um pico de força não inferior a 24 kN.

#### ( iii ) Ensaio de arrancamento por torção (*torque test*)

Este ensaio, semelhante ao ensaio de *pull-off*, possui em relação a este, a vantagem de avaliar uma propriedade que se aproxima mais dos esforços realmente envolvidos na ligação. Neste ensaio, como em vez de uma pastilha é utilizado um anel, existe a desvantagem de obrigar a dois pré-caroteamentos por ensaio, um pelo exterior e outro pelo interior do anel. O anel é então arrancado por torção permitindo saber qual a resistência da ligação à referida acção (Figura 5.8).





Figura 5.7 – Esquema do ensaio de arrancamento por torção (Myers, J. et al).

Tabela 4.12 – Controlo de Qualidade - Resistência da ligação

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
1.	Foram executados ensaios para a avaliação da resistência da ligação (aderência) do primário com o substrato?			
2.	Foram executados ensaios para a avaliação da resistência da ligação (aderência) da argamassa de regularização com o substrato?			
3.	Foram executados ensaios para a avaliação da resistência da ligação (aderência) do adesivo/resina de impregnação com o substrato?			
4.	As zonas com resistências de ligação não aceitáveis foram devidamente mapeadas?			

N/A – Não Avaliado

### 5.2.3 Ensaios em Laboratório

Como referido no ponto dedicado ao manuseamento de resinas epoxídicas e ao ponto dedicado à aplicação do compósito de FRP é necessário realizar ensaios em laboratório para a caracterização dos provetes recolhidos em obra.

Tabela 4.13 – Controlo de Qualidade - Características dos Materiais

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
1.	Foram executados todos os ensaios em laboratório previstos para a caracterização do primário?			
2.	Foram executados todos os ensaios em laboratório previstos para a caracterização da argamassa de regularização?			
3.	Foram executados todos os ensaios em laboratório previstos para a caracterização do adesivo/resina de impregnação?			



Tabela 4.13 – Controlo de Qualidade - Características dos Materiais (cont.)

CRITÉRIOS DE INSPECÇÃO E VERIFICAÇÃO		SIM	NÃO	N/A
4.	Foram executados todos os ensaios em laboratório previstos para a caracterização do compósito de FRP curado “ <i>in situ</i> ”?			
5.	As zonas onde foram aplicadas resinas ou compósitos de FRP curados “ <i>in situ</i> ” não cumpriram com os requisitos foram devidamente mapeadas?			

N/A – Não Avaliado

### 5.3 Considerações Finais

Este controlo de qualidade proposto cobre o processo de construção de um reforço na sua fase de execução e após a sua execução. Durante a execução intervém na análise de projecto, na qualificação das empresas, na inspecção dos materiais, na operação de preparação do substrato, no sensível manuseamento das resinas e por fim na aplicação do compósito de FRP. Após a execução conduz uma inspecção ao reforço aplicado através de uma inspecção visual e de ensaios em obra e em laboratório.

Este capítulo sublinha a necessidade de controlar os procedimentos de construção do reforço durante todo o seu processo. O controlo de qualidade constitui uma obrigatoriedade a implementar em obra, que deverá ser uma imposição do caderno de encargos, para que se possa de facto certificar da boa execução do reforço.

O controlo de qualidade, apresentando-se sob a forma de listas de verificação, torna mais fácil a percepção dos procedimentos críticos e da sua cronologia na operação de reforço. A sua implementação em obra também fica facilitada e otimizada.

A matéria constante neste controlo de qualidade pode ser utilizada tanto pelo aplicador que de forma expedita consegue fazer um controlo interno do seu trabalho, como pela fiscalização para atestar a correcta execução do reforço, ou seja, o cumprimento do controlo de qualidade.

O controlo de qualidade mostra a necessidade de validar o reforço através da inspecção visual, de ensaios ao sistema aplicado, ensaios “*in situ*”, e ensaios aos materiais “fabricados” em obra, ensaios em laboratório.

São assim apresentados vários ensaios para realização em obra dos quais se destacam, por serem expeditos e de mais fácil execução, o ensaio de *pull-off* e o *tap test*. Estes dois ensaios permitem medir a resistência da interface e a existência de vazios, respectivamente, de forma rápida, prática e com custos muito reduzidos.



## CAPÍTULO 6

### PASSAGEM INFERIOR 10 DO IC24

Foi possibilitado pela empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A. o acompanhamento da execução do reforço da Passagem Inferior (PI) 10 do grupo de Obras de Arte da Scut do Grande Porto IC24. Este reforço está integrado na obra de alargamento do IC24, entre o Freixieiro e Alfena, de duas para três vias em cada sentido. Salienta-se que a posição na obra foi de apenas “espectador” não caindo dentro do âmbito desta acção e do acordo com a MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A. intervir em qualquer das fases.

A Figura 6.1 mostra a PI 10, pode-se observar que a sua estrutura é integralmente em betão armado e que consiste num tabuleiro com três vãos, apoiado nos seus encontros e em dois alinhamentos de pilares.



Figura 6.1 – Passagem Inferior 10 – IC 24.

O incremento de tráfego conseguido pelo alargamento implicou que várias PIs, como a PI 10, necessitassem de ser reforçadas para fazer face às novas solicitações. Concretamente, a PI 10, necessitou que o seu tabuleiro existente fosse reforçado para aumentar a sua capacidade resistente aos momentos positivos. Para tal foi previsto pelo projectista a adição de compósitos de FRP, como armadura de reforço externa, na sua face inferior. O sistema compósito de FRP adoptado foi o sistema curado “*in situ*” com mantas de carbono.

O sistema curado *“in situ”* seleccionado para a obra tem a referência S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.) e é constituído pelos materiais descritos na Tabela 6.1 e ilustrados na Figura 6.2.

Tabela 6.1 – Sistema de FRP usado na PI 10 - Sistema curado *“in situ”*.

MARCA (Representante)	PRODUTO	REFERÊNCIA COMERCIAL
S&P REINFORCEMENT (Clever Reinforcement Ibéria, Lda.)	Argamassa de Regularização	S&P Resin Epoxy 220
	Primário	S&P Resin Epoxy 50
	Resina de Impregnação	S&P Resin Epoxy 55
	Manta	S&P C-Sheet 240 (300g/m <sup>2</sup> ) (fibra de carbono)

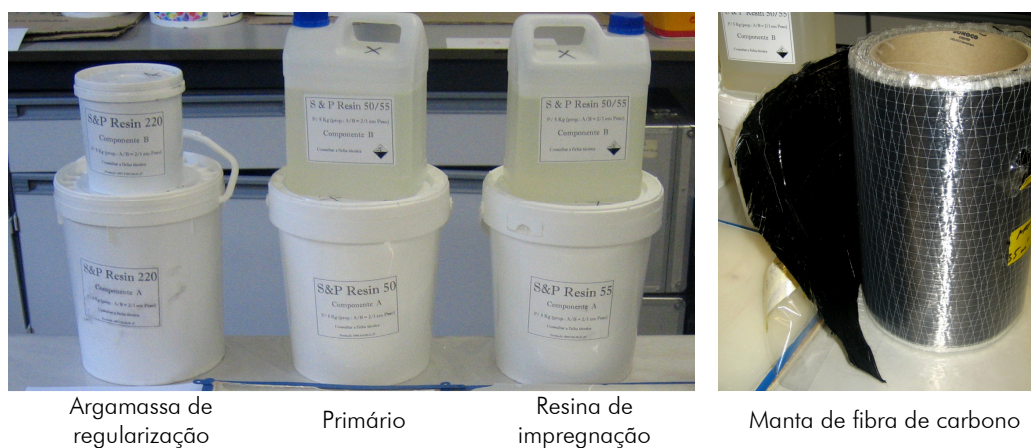


Figura 6.2 – Produtos constituintes do sistema curado *“in situ”* usado na PI 10.

## 6.1 Tarefas Realizadas

O acompanhamento das várias fases da construção do reforço da PI 10 com sistemas compósitos de FRP teve como objectivo principal a calibração e validação dos procedimentos de aplicação e do controlo de qualidade até então elaborados.

O âmbito deste acompanhamento abrangeu tanto a fase de execução do reforço como a fase de pós-execução do Reforço. Na primeira fase o acompanhamento incidiu sobretudo na preparação e na reparação da superfície destinada a receber o reforço e na aplicação do compósito de FRP. Na segunda fase foram a inspecção do reforço aplicado e os ensaios em laboratório os principais alvos.

No sentido de sistematizar esta operação de acompanhamento, com vista a intervenções futuras no âmbito do controlo de qualidade da construção de um reforço com estes sistemas, foi elaborada a Tabela 6.2 com

as “Tarefas Realizadas em Obra” onde se encontram as medidas de controlo de actividades desenvolvidas durante a fase de aplicação da técnica de reforço com sistemas compósitos de FRP.

Face a algumas limitações de recursos do actual laboratório LEMC e às condicionantes na programação das actividades de reparação da passagem inferior PI 10 determinadas tarefas não puderam ser concretizadas.

Tabela 6.2 – “Tarefas Realizadas em Obra”

LOCAL	TAREFA	CRITÉRIO	AMOSTRA	REFERÊNCIA
Obra	Preparação de amostras	(i) Zonas de amostragem para juntas de aderência	Betão/Primário	Junta PP
			Betão/Primário/ Arg. de Regularização (Putty)	Junta PA
			Betão/Primário/ Manta curada de FRP	Junta PF
		(ii) Misturas de resinas	S&P Resin Epoxy 50	SP50 (placa)
				SP50_P (Prismas)
			S&P Resin Epoxy 55	SP55 (placa)
				SP55_P (Prismas)
			S&P Resin Epoxy 220	SP220_P (Prismas)
		(iii) Compósito de FRP curado “in situ”	S&P C-Sheet 240 (300g/m <sup>2</sup> ) + S&P Resin Epoxy 55	SPS240 (placa)
	Ensaio de aderência	(i) Zonas de amostragem para juntas de aderência	Junta PP	Ensaio de <i>pull-off</i>
			Junta PA	Ensaio de <i>pull-off</i>
			Junta PF	Ensaio de <i>pull-off</i>
Observação e acompanhamento		(i) Medição da temperatura/humidade relativa	Ambiente	Higrómetro
		(ii) Controlo do estado de cura	Juntas PP/PA/PF	Análise visual
		(iii) Inspeção final	Geral	Análise visual <i>Tap test</i>

## 6.2 Fase de Execução do Reforço

Procurou-se nesta fase seguir todo o processo de construção do reforço, começando pela preparação da superfície e terminado com a colagem do compósito de FRP. Incluindo-se a execução das zonas de

amostragem para a realização dos ensaios *"in situ"* e de provetes para a realização dos ensaios em laboratório.



Figura 6.3 – Principais fases de aplicação do sistema compósito de FRP.

Durante esta fase existiu uma preocupação adicional em saber quais os procedimentos mais críticos em termos de dificuldade de cumprimento para com o especificado e recomendado, não apenas em relação concretamente à construção do reforço como também à execução das zonas de amostragem e dos provetes.

### 6.2.1 Observação e Acompanhamento

Este ponto dedicado à observação e acompanhamento da obra apresenta as limitações desta intervenção e as ilações consideradas como mais relevantes retiradas desta fase.

Pelo facto do início da observação e acompanhamento terem-se iniciado já na fase de aplicação, não foram incluídos alguns dos procedimentos que figuram no processo de reforço e que se situam temporalmente antes desta fase. É o caso da análise do projecto, da qualificação das empresas e da recepção dos materiais.

Também não foi possível aferir algumas conclusões em relação à conservação dos materiais porque o armazenamento destes se processava nas instalações do subempreiteiro, fora do local da obra.

Por fim, ressalva-se ainda que a sujeição aos trabalhos previstos não permitiu a observação de alguns procedimentos por estes não estarem previstos. Esses prenderam-se de forma mais significativa na fase de inspecção do substrato que não foi realizada quase na sua totalidade sendo que, a que foi realizada, tenha precedido a entrada em obra.

Mesmo não tendo sido possível acompanhar este processo de construção de um reforço com compósitos de FRP em toda a sua extensão, esta etapa deste trabalho mostrou-se bastante produtiva no sentido em que se retiraram importantes conclusões que se reflectiram na versão final dos procedimentos e controlo de qualidade apresentados nos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

A observação do desenvolvimento dos trabalhos revelou que de facto existem recomendações que se tornam de difícil implementação em obra. Com efeito, o cenário de obra, com todas as variáveis e pressões

temporais facilmente potenciam a negligência e subsequente incumprimento de todas as supostas obrigações.

#### **( i ) Verificação da superfície**

O cumprimento com o requerido para a superfície a aplicar o reforço facilmente é pontualmente quebrado, podendo existir zonas em que a decapagem ainda que realizada não o foi de forma suficiente para cumprir com o desejado.

Como se sabe, a decapagem é um procedimento que implica um grande desenvolvimento de poeiras o que obriga a uma posterior limpeza cuidada da superfície para a subsequente impregnação do substrato com primário. A pressão do cumprimento do calendário previsto para a execução do reforço potencia que tarefas sem “visibilidade”, como uma limpeza adequada da superfície, sejam negligenciadas.

#### **( ii ) Manuseamento da resina**

A avaliação das condições higrotérmicas para a aferição de que estas se encontram apropriadas à aplicação de resinas, procedimento que deveria ser sistematicamente controlado, apenas se prendeu com o facto de se controlar se estava ou não a chover.

### **6.2.2 Recolha de Amostras**

Como já evidenciado, na construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP, existem produtos que são preparados e construídos em obra, como é o caso das resinas (primário, a argamassa de regularização e a resina de impregnação) que são misturadas em obra e do compósito de FRP curado “*in situ*” que é “fabricado” em obra. As propriedades destes não podem ser portanto fidedignamente caracterizadas pelo disposto nas suas fichas pois o processo de mistura/fabricação é influenciado por variáveis como a mão-de-obra e as condições higrotérmicas, que se reflectem nas propriedades do produto final. Como tal, o controlo de qualidade impõe a sua caracterização, o que obriga á recolha de amostras para o seu posterior ensaio em laboratório.

A execução de provetes tanto das resinas como do compósito de FRP obriga naturalmente a cuidados especiais e à atenção a determinados pontos. Pretende-se assim neste ponto abordar os critérios estabelecidos para a preparação e recolha dessas amostras.

#### **6.2.2.1 Execução de Provetes de Resina**

Todas as amostras para serem representativas da mistura à qual correspondem e que foi aplicada têm de curar nas mesmas condições desta, ou seja, em obra. É, por isso, necessário atribuir especial atenção à manutenção da integridade das amostras durante o seu período de cura.

Embora o controlo de qualidade imponha a recolha de amostras de todas as misturas, nesta intervenção (de base académica), apenas foram extraídas amostras de uma mistura de cada uma das resinas utilizadas na obra da PI 10.

As dimensões e as quantidades das amostras foram as seguintes:

- 3 Amostras com  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  (Figura 6.4)

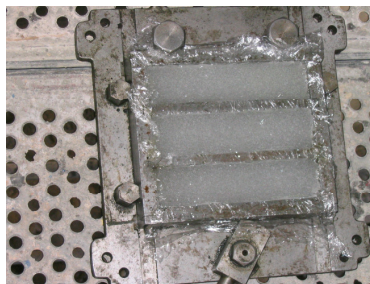


Figura 6.4 – Prismas.

- 1 Amostra com  $300 \times 200 \times 4 \text{ mm}^3$  (Figura 6.5)

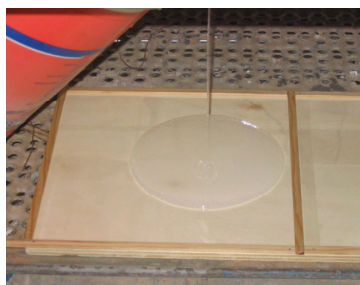


Figura 6.5 – Execução da placa.

É importante que na execução das amostras se tenha cuidado para evitar a formação de vazios no seu interior. As amostras recolhidas devem ser protegidas para que durante o período de tempo em que permanecem em obra não sejam comprometidas por trabalhadores não alertados ou mesmo por “curiosos”.

Após a sua cura, as amostras foram enviados para o laboratório a fim de serem realizados os ensaios de caracterização dos materiais, com o fim de atestar a sua conformidade.

Nas Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 identificam-se as amostras de primário, a argamassa de regularização (*putty*) e a resina de impregnação, respectivamente, e para cada uma delas os ensaios a realizar.



Tabela 6.3 – Primário: Amostras da S&amp;P Resin Epoxy 50.

AMOSTRA			PROVETES		OBSERVAÇÕES
REFERENCIA	FORMA	DATA MISTURA	ENSAIO	Nº PROVETES (referência)	
SP50	Placa 300 x 200 x 3 mm <sup>3</sup>	03-04-2006	Tracção	5 (TR_SP50_i)	Recomendações das EN 1504
			Flexão	3 (FL_SP50_i)	
			DSC	3 (DS_SP50_i)	
			DMTA	3 (DM_SP50_i)	
SP50_P	Prisma 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup>		Compressão	1 (CO_SP50_Pi)	Ajuste de normas para PC (argamassas e betões poliméricos)
			Flexão	2 (FC_SP50_Pi)	
			Compressão (Meios-Prismas)	4 (FC_SP50_Pi_Ci)	

i – Índices associados ao nº do provete proposto para ensaio (i = 1 - nº de provetes).

Tabela 6.4 – Argamassa de regularização: Amostras da S&amp;P Resin Epoxy 220.

AMOSTRA			PROVETES		OBSERVAÇÕES
REFERENCIA	FORMA	DATA MISTURA	ENSAIO	Nº PROVETES (referência)	
SP220_P	Prisma 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup>	04-04-2006	DSC	3 (DS_SP220_i)	Recomendações das EN 1504
			DMTA	3 (DM_SP220_i)	

i – Índice associado ao nº do provete proposto para ensaio (i = 1 - nº de provetes).

Tabela 6.5 – Resina de impregnação: Amostras da S&amp;P Resin Epoxy 55.

AMOSTRA			PROVETES		OBSERVAÇÕES
REFERENCIA	FORMA	DATA MISTURA	ENSAIO	Nº PROVETES (referência)	
SP55	Placa 300 x 200 x 3 mm <sup>3</sup>	04-04-2006	Tracção	5 (TR_SP55_i)	Recomendações das EN 1504
			Flexão	3 (FL_SP55_i)	
			DSC	3 (DS_SP55_i)	
			DMTA	3 (DM_SP55_i)	
SP55_P	Prisma 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup>		Compressão	1 (CO_SP55_Pi)	Ajuste de normas para PC (argamassas e betões poliméricos)
			Flexão	2 (FC_SP55_Pi)	
			Compressão (Meios-Prismas)	4 (FC_SP55_Pi_Ci)	

i, j – Índices associados ao nº do provete proposto para ensaio (i, j = 1 - nº de provetes).

### 6.2.2.2 Execução do Provete de Compósito de FRP Curado “*in situ*”

A certificação da manta, como fibra seca pronta a utilizar, dispensa a execução de um controlo de qualidade após a sua recepção, uma vez que é da responsabilidade do fornecedor a garantia das propriedades exigidas no projecto.

Contudo, o seu comportamento em conjunto com a resina de impregnação, como compósito de FRP, não pode ser obviamente atestado pelo fornecedor pois também depende da forma e das condições de execução.

Assim, para a realização do controlo das propriedades do compósito de FRP curado “*in situ*”, é, à semelhança das resinas, necessário recolher amostras para o seu ensaio em laboratório. Estas amostras também deverão curar em obra nas condições do restante sistema compósito de FRP aplicado.

A quantidade e a dimensão das amostras recolhidas também se prenderam aqui com o tipo e a quantidade de ensaios a realizar e ainda com a pormenorização do reforço previsto, igualando-se a largura e o número de camadas às previstas. Assim, no presente caso foi executado:

- 1 Amostra com 300 x 600 mm<sup>2</sup> de 1 camada de manta (Figura 6.6).

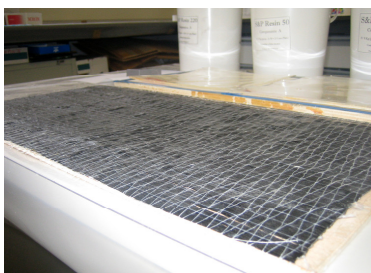


Figura 6.6 – Amostra de compósito de FRP curado “*in situ*”.

A representatividade deste provete é relativa uma vez que, mesmo com a sua construção decorrendo no seguimento da aplicação em obra, não é executado exactamente da mesma forma, denotando-se um maior zelo pela boa execução por parte dos aplicadores.

Após a cura, a amostra foi enviada para o laboratório a fim de serem realizados os ensaios de caracterização do material curado, de modo a atestar a sua conformidade. Na Tabela 6.6 identifica-se a amostra e os ensaios realizados em laboratório para o compósito FRP curado “*in situ*” (S&P C-Sheet 240 (300g/m<sup>2</sup>) + S&P Resin Epoxy 55). A Figura 6.7 ilustra o aspecto da amostra na fase de fibra seca em obra e na fase de compósito de FRP curado (fibra+resina de saturação+cura) em laboratório.

Tabela 6.6 – Compósito de CFRP: Amostras do S&P C-Sheet 240 (300g/m<sup>2</sup>).

AMOSTRA			PROVETES		OBSERVAÇÕES
REFERENCIA	FORMA	DATA MISTURA	ENSAIO	Nº PROVETES (referência)	
SPS240	Placa 600 x 300 mm <sup>2</sup>	04-04-2006	Tracção	5 (TR_SPS240_i)	Os ensaios DSC e DMTA não são condicionantes (ver resinas)
			DSC	3 (DS_SPS240_i)	
			DMTA	3 (DM_SPS240_i)	

i, j – Índices associados ao nº do provete proposto para ensaio (i,j = 1 - nº de provetes).

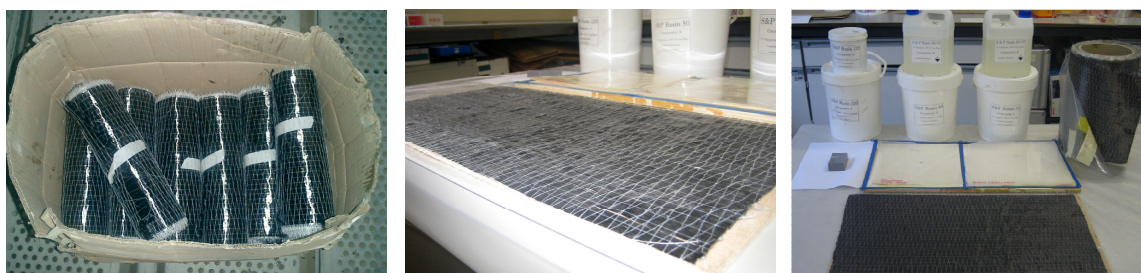


Figura 6.7 – Aspecto geral da amostra: Manta carbono (fibra seca) e compósito de FRP curado (fibra + resina).

### 6.2.3 Execução das Zonas de Amostragem

A avaliação da qualidade da ligação colada entre os diferentes materiais intervenientes na operação de reforço é parte integrante do controlo de qualidade. De facto, como já referido, para que o reforço seja validado, a resistência da ligação do compósito de FRP ao substrato de betão terá de cumprir com um valor mínimo admissível.

O ensaio utilizado para a sua avaliação, ensaio de *pull-off*, é semi-destrutivo, como tal, os locais escolhidos para os ensaios devem ser ponderados. É então obrigatório que se opte ou por locais pouco esforçados que possam comportar a diminuição de secção de reforço, ou pela execução de zonas de amostragem paralelas à execução do reforço. Na PI 10 optou-se pela execução de zonas de amostragem pela principal razão de não querer de forma nenhuma interferir com o sistema de reforço estabelecido.

A zona de amostragem, para ser representativa, tem de ser executada nas mesmas condições da restante empreitada e no decorrer desta. Foi nesse sentido decidido que estas fossem realizadas em locais contíguos ao da aplicação corrente do reforço projectado.

O tipo de juntas em análise e a dimensão das respectivas zonas de amostragem estão ilustrados na Figura 6.7 e descritos na Tabela 6.7.

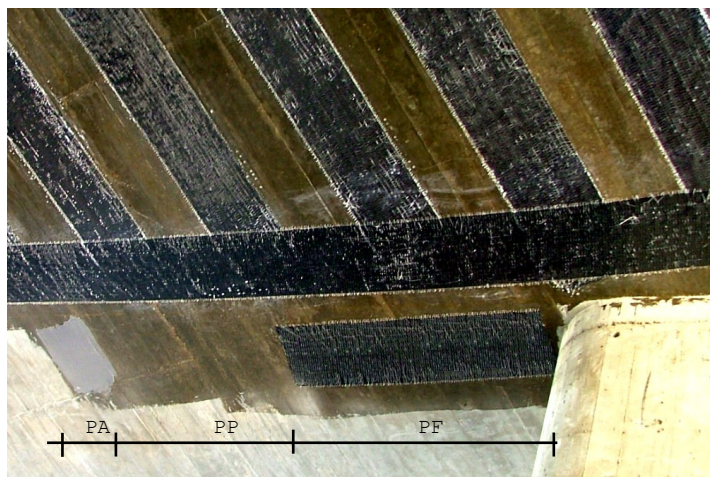


Figura 6.7 – Zona de Amostragem das juntas PP, PA e PF.

Tabela 6.7 – Identificação das zonas de amostragem para juntas de aderência.

CRITÉRIO	REFERÊNCIA	AMOSTRA	MATERIAIS	DATA
Zonas de amostragem (Juntas de aderência)	Junta PP	Betão / Primário ( $\geq 30 \times 20 \text{ cm}^2$ )	Betão + S&P Resin Epoxy 50	03-04-2006
	Junta PA	Betão / Primário / Arg. de Regularização (Putty) ( $\geq 30 \times 20 \text{ cm}^2$ )	Betão + S&P Resin Epoxy 50 + S&P Resin Epoxy 220	04-04-2006
	Junta PF	Betão / Primário / Manta curada de CFRP ( $\geq 30 \times 60 \text{ cm}^2$ )	Betão + S&P Resin Epoxy 50 + S&P Resin Epoxy 55 + S&P C-Sheet 240 (300g/m <sup>2</sup> )	04-04-2006

Refira-se, mais uma vez, que a observação em obra começou na preparação do substrato não tendo sido feita a inspecção às características do substrato, o que, nesta análise de aderência, se admitiu estarem cumpridos ao critérios de conformidade para a técnica de colagem, pelo facto de essa fase ser aceite pela empresa responsável pela fiscalização da obra.

### 6.3 Fase Pós-execução do Reforço

Concluída a operação de reforço foram realizadas uma série de acções, presentes no controlo de qualidade, cuja finalidade foi averiguar se o sistema compósito de FRP aplicado apresenta as conformidades exigidas à técnica de colagem exterior. Essas acções consistiram na inspecção visual, na realização dos ensaios de avaliação da aderência (ensaios de *pull-off*) e na detecção de vazios no interior do sistema compósito de FRP (ensaio acústico por pancadas (*tap test*)).

### 6.3.1 Inspeção Visual ao Sistema Aplicado

Procurou-se na inspeção visual detectar não conformidades decorrentes de uma eventual falha na aplicação.

Na PI 10 destacou-se a presença de escorrimentos verticais de resina de impregnação traduzidos na existência de frequentes “estalactites” (Figura 6.8), apontando para um grau de tixotropia e viscosidade da mistura menos apropriados para esta aplicação e/ou para as temperaturas presentes.

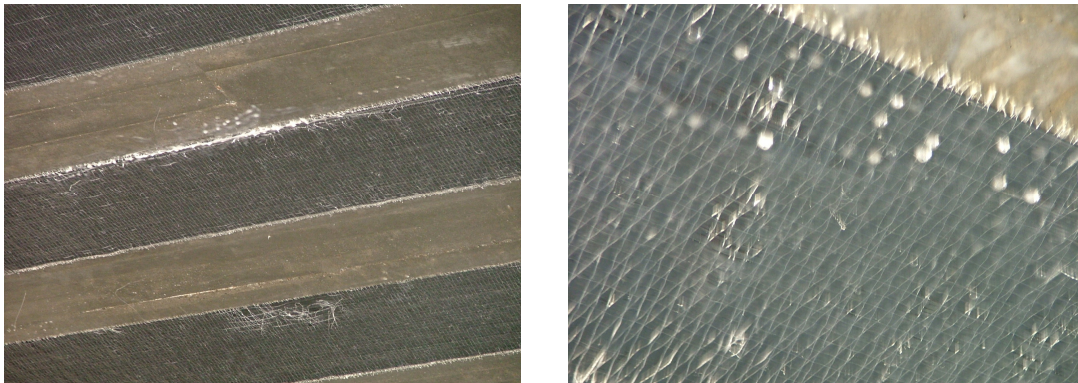


Figura 6.8 – Escorrimentos.

Provavelmente devido à perda de resina de impregnação, proporcionada pelo escorrimento acima referido, e a alguma irregularidade do substrato, constatou-se também a existência de algumas de bolsas de vazios (Figura 6.9) no compósito de FRP e entre este e o substrato.

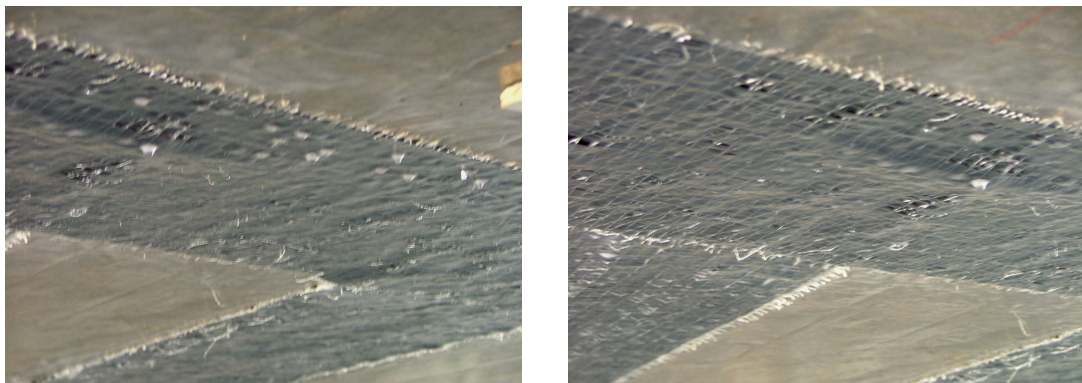


Figura 6.9 – Bolsas de vazios.

### 6.3.2 Ensaios de *Pull-off*

Para a avaliação da resistência da junta colada nas zonas de amostragem (PP, PA e PF descritas no ponto 6.2.3), recorreu-se ao ensaio de arrancamento por tracção directa (ensaio de *pull-off*), descrito na Norma EN 1542 e nas especificações do LNEC FE-Pa36 (Juvandes et al., 2007).



Como descrito no capítulo anterior, dedicado ao controlo de qualidade, o ensaio de *pull-off* implica as acções prévias de caroteamento e colagem de pastilhas. Em relação a estes procedimentos salienta-se a dificuldade da colagem da pastilha sobre o compósito de FRP. A irregularidade deste substrato obriga a cuidados especiais para que a qualidade da colagem não fique comprometida pela presença de vazios. A Figura 6.10 apresenta as pastilhas coladas sobre as zonas de amostragem.

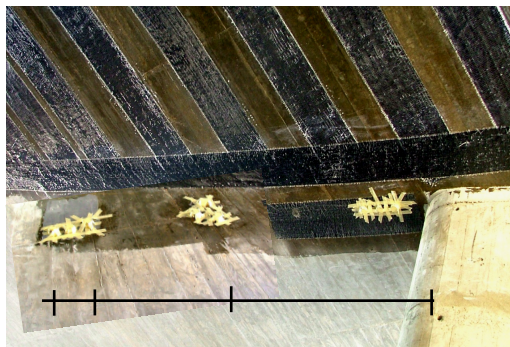


Figura 6.10 – Zonas de Amostragem com as pastilhas coladas.

A Tabela 6.8 resume os resultados obtidos nos ensaios em termos de valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação relativos à resistência à tracção por arrancamento.

Tabela 6.8 – Resultado dos ensaios de *pull-off* nas juntas de amostragem.

ZONA DE AMOSTRAGEM			RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR ARRANCAMENTO - $f_{ct,p}$				OBSERVAÇÕES
Junta	Ligação	Cura (dias)	Nº de Provetes	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C. Variação (%)	
PP	Betão/Primário	16	3	4,267	1,037	24,3	Corte pelo betão
PA	Betão/Primário/Arg. de Regularização	15	3	4,580	0,767	16,7	Corte pelo betão
PF	Betão/Primário/Manta de CFRP	15	3	2,600	0,283	10,9	Corte pela ligação Pastilha-Manta (*)

(\*) - Modo de ruína indesejável mas admitido na análise da tensão de aderência porque o  $f_{ct,p}$  é superior a 1,5 MPa.

Na Figura 6.11 ilustram-se os modos de ruína obtidos nos provetes de arrancamento realizados (3 provetes por junta). Na maioria dos ensaios a ruína dá-se no interior do betão como desejável do ponto de vista do sucesso do reforço. No entanto, pode-se verificar que na pastilha nº3 da Junta PA a rotura se dá pela interface adesivo da pastilha/argamassa de regularização, o que implicará um julgamento cuidadoso do resultado sendo que este representará apenas um “*lower bound*” da resistência da ligação. Na pastilha nº3 da Junta PF a ruína acontece entre o compósito de FRP e o substrato de betão o que indicia uma falha na execução do reforço.

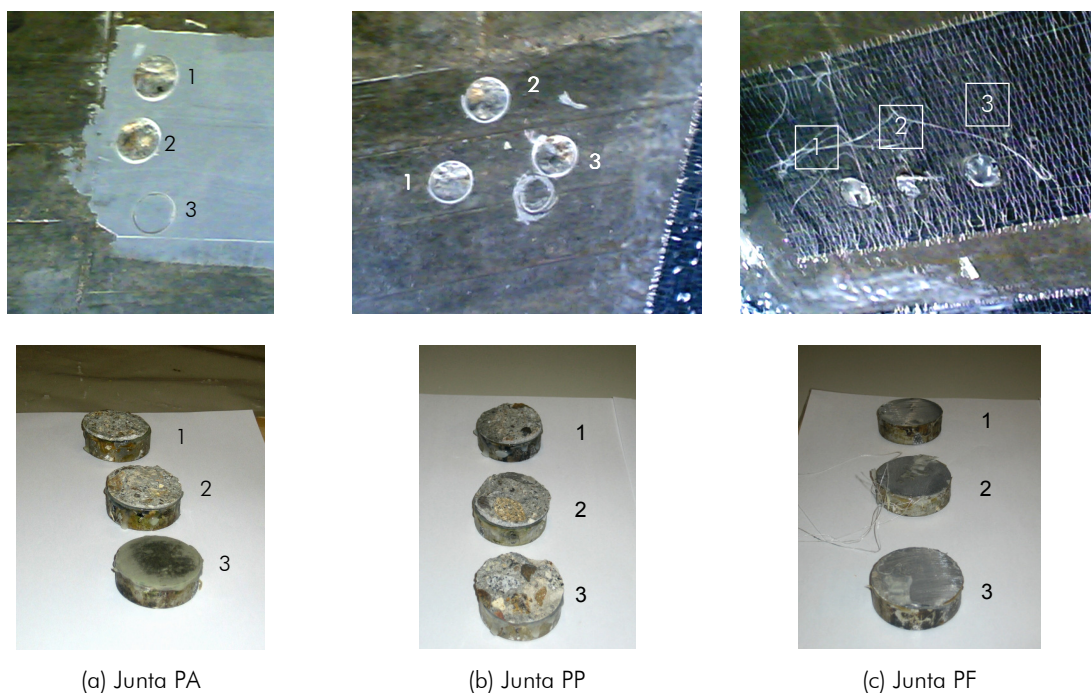


Figura 6.11 – Modos de ruína.

### 6.3.3 Ensaio *Tap Test*

Este ensaio também foi realizado, de acordo com o descrito no Capítulo 5, dedicado ao controlo de qualidade.

O ensaio foi executado numa área circundante às zonas de amostragem dos ensaios de *pull-off* e permitiu detectar a presença de algumas bolsas de vazios. Esta informação vem corroborar o modo de ruína detectado numa das pastilhas da Junta PF mostrando assim a validade deste ensaio.

### 6.3.4 Ensaios em Laboratório

Neste ponto, descrevem-se as actividades correspondentes à fase de caracterização das propriedades dos materiais resultantes da mistura em obra dos produtos integrantes do sistema compósito de FRP. Estes ensaios são obviamente realizados em laboratório e são executados a partir das amostras recolhidas na obra.

Não é pretendido fazer aqui uma exposição de todo o processo de ensaios em laboratório por não se considerar estar dentro do âmbito deste trabalho. Para esse efeito podem-se consultar o “Relatório de Ensaios de Controlo de Qualidade na PI10 do IC24” e o “CASA DA MÚSICA – LOJA OPTIMUS – Relatório de Ensaios de Controlo de Qualidade”.

Indicam-se, no entanto, quais os ensaios realizados e de seguida apresentam-se as “Fichas de Controlo dos Materiais”, que são o resumo das propriedades a confirmar (conformidade com o projecto) para os

materiais aplicados na obra, quer para as resinas (Tabela 6.10, 6.11 e 6.12) quer para o compósito de FRP curado “*in situ*” (Tabela 6.13).

Na Tabela 6.9 apresentam-se os ensaios realizados e as normas segundo os quais foram realizados.

Tabela 6.9 – Ensaio realizados em Laboratório.

TAREFA	CRITÉRIO	AMOSTRA	NORMA
Caracterização do Primário [S&P Resin Epoxy 50]  e  Caracterização da Resina de Saturação (ou impregnação) [S&P Resin Epoxy 55]	(i) Ensaio de tracção	Placas	ASTM D 638-02  ISO 527 (Part 1 + 2)
	(ii) Ensaio de flexão	Placas	ASTM D 790-02  EN ISO 178
		Prismas	EN 12190  NP 196-1
	(iii) Ensaio de compressão	Prismas	ASTM D 695-02  Ajuste de: EN 12190, NP 196-1, E 397-1993
		Meios-Prismas	EN 12190  NP 196-1
	(iv) Calorimetria diferencial de varrimento (DSC)	Fragmentos cortados	ISO 11357 (Part 1 + 2)
	(v) Análise térmica dinâmica-mecânica (DMTA)	Placas	ISO 6721 (Part 1 + 5)
Caraterização da Arg. de Regularização (Putty) [S&P Resin Epoxy 220]	(i) Calorimetria diferencial de varrimento (DSC)	Fragmentos cortados	ISO 11357 (Part 1 + 2)
	(ii) Análise térmica dinâmica-mecânica (DMTA)	Placas	ISO 6721 (Part 1 + 5)
Caraterização do Compósito de CFRP curado “in situ” [S&P C-Sheet 240 (300g/m <sup>2</sup> ) + S&P Resin Epoxy 55]	(i) Ensaio de tracção	Placas	ASTM D 3039/D 3039M ISO 527 (Part 5)
	(ii) Calorimetria diferencial de varrimento (DSC)	Fragmentos cortados	ISO 11357 (Part 1 + 2)
	(iii) Análise térmica dinâmica-mecânica (DMTA)	Placas	ISO 6721 (Part 1 + 5)

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEMec), Unidade de Materiais Compósitos (CEMACOM), Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), FEUP

Apresentam-se de seguida as “Fichas de Controlo dos Materiais” complementadas com os resultados obtidos nos ensaios em laboratório.



Tabela 6.10 - Ficha de controlo da S&amp;P Resin Epoxy 50 – Especificações.

FASE DE EXECUÇÃO	PARÂMETRO/AVALIAÇÃO	NORMA	VALOR MÉDIO	OBSERVAÇÕES	
Antes da aplicação	Período de validade ( <i>Shelf time</i> )	-	12 meses [1]	Ficha técnica	
	Tempo de contacto ( <i>Open time</i> )	EN 12189	s/i	Ficha técnica	
	Tempo estimado de cura	-	7 dias	Ficha técnica	
	Aptidão para aplicações em superfícies verticais e intradorsos /horizontais	EN 1799	s/i	Ficha técnica	
	Reacção ao fogo	Indicar a Euroclasse	s/i	Ficha técnica	
Após a cura dos materiais	Temperatura e humidade relativa do ambiente e superfície	Termómetro Higrómetro	T= 4, a 23 °C HR= 80-100 %	Obra	
	Resistência à tracção	ASTM D 638-	22,31 MPa	Amostra/Laboratório	
	Módulo de elasticidade em tracção	02 ISO 527 (Pt 1+2)	2,4 GPa	Amostra/Laboratório	
	Resistência à flexão (Placas)	ASTM D790-02 EN ISO 178	54,87 MPa	Amostra/Laboratório	
	Módulo de elasticidade em flexão (Placas)		1,7 GPa	Amostra/Laboratório	
	Resistência a compressão	ASTM D 695-02 EN 12190	60,41 MPa	Amostra/Laboratório	
			Meios-Prismas		83,68 MPa
	Módulo de elasticidade em compressão	NP 196-1 E 397-1993	3,4 GPa	Amostra/Laboratório	
	Temperatura de transição vítrea (Tg):			Amostra/Laboratório	
		- DSC	ISO 11357 (Pt 1+2)		42,96 °C
		- DMTA	ISO 6721 (Pt 1+5)		39,44 °C
		Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	n/d	Amostra/Laboratório
		Absorção de água (em casos especiais)	EN 13580	n/d	Amostra/Laboratório
Controlo da aderência	Tipo de preparação da superfície	Ficha técnica	Decapagem com esmeril	Obra	
	Avaliação do estado de cura	Inspecção Visual	n/d	Obra	
	Resistência à tracção por arrancamento (ensaio de <i>pull-off</i> )	EN 1542 LNEC FE-Pa 36	4,267 MPa	Obra	
Inspecção final	Análise visual	-	observar	Obra	
	Ensaio acústico por pancadas ( <i>tap test</i> )	-	medir	Obra	

[1] – Nas embalagens originais e sujeita a temperaturas compreendidas entre 5°C e 25°C;

s/i - Não especificado; n/d – não determinado;

Tabela 6.11 - Ficha de controlo da S&amp;P Resin Epoxy 55 – Especificações.

FASE DE EXECUÇÃO	PARÂMETRO/AVALIAÇÃO	NORMA	VALOR MÉDIO	OBSERVAÇÕES
Antes da aplicação	Período de validade ( <i>Shelf time</i> )	-	12 meses [1]	Ficha técnica
	Tempo de contacto ( <i>Open time</i> )	EN 12189	s/i	Ficha técnica
	Tempo estimado de cura	-	7 dias	Ficha técnica
	Aptidão para aplicações em superfícies verticais e intradorsos /horizontais	EN 1799	s/i	Ficha técnica
	Reacção ao fogo	Indicar a Euroclasse	s/i	Ficha técnica
Após a cura dos materiais	Temperatura e humidade relativa do ambiente e superfície	Termómetro Higrómetro	T= 4, a 23 °C HR= 80-100 %	Obra
	Resistência à tracção	ASTM D 638-	38,69 MPa	Amostra/Laboratório
	Módulo de elasticidade em tracção	02 ISO 527 (Pt 1+2)	2,4 GPa	Amostra/Laboratório
	Resistência à flexão (Placas)	ASTM D790-02	48,19 MPa	Amostra/Laboratório
	Módulo de elasticidade em flexão (Placas)	EN ISO 178	1,8 GPa	Amostra/Laboratório
	Resistência à compressão	Prismas: ASTM D 695-	56,92 MPa	Amostra/Laboratório
		Meios-Prismas 02 EN 12190	76,82 MPa	
	Módulo de elasticidade em compressão	NP 196-1 E 397-1993	2,9 GPa	Amostra/Laboratório
	Temperatura de transição vítrea (Tg):			Amostra/Laboratório
	- DSC		ISO 11357 (Pt 1+2)	
	- DMTA		ISO 6721 (Pt 1+5)	
	Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	n/d	Amostra/Laboratório
	Absorção de água (em casos especiais)	EN 13580	n/d	Amostra/Laboratório
Controlo da aderência	Tipo de preparação da superfície	Ficha técnica	[2]	Amostra/Laboratório
	Avaliação do estado de cura	Inspeção Visual	n/d	Obra
	Resistência à tracção por arrancamento (ensaios de <i>Pull-off</i> )	EN 1542 LNEC FE-Pa 36	[2]	Obra
Inspeção final	Análise visual	-	observar	Obra
	Ensaio acústico por pancadas ( <i>Tap test</i> )	-	medir	Obra

[1] – Nas embalagens originais e sujeita a temperaturas compreendidas entre 5°C e 25°C.

[2] – Admite-se a Informação obtida para a resina S&P Resin Epoxy 50.

s/i - Não especificado; n/d – não determinado.

Tabela 6.12 - Ficha de controlo da S&amp;P Resin Epoxy 220 – Especificações.

FASE DE EXECUÇÃO	PARÂMETRO/AVALIAÇÃO	NORMA	VALOR MÉDIO	OBSERVAÇÕES
Antes da aplicação	Período de validade ( <i>Shelf time</i> )	-	1 ano [1]	Ficha técnica
	Tempo de contacto ( <i>Open time</i> )	EN 12189	s/i	Ficha técnica
	Tempo estimado de cura	-	s/i	Ficha técnica
	Aptidão para aplicações em superfícies verticais e intradorsos /horizontais	EN 1799	s/i	Ficha técnica
	Reacção ao fogo	Indicar a Euroclasse	s/i	Ficha técnica
Após a cura dos materiais	Temperatura e humidade relativa do ambiente e superfície	Termómetro Higrómetro	T= 4, a 23 °C HR= 80-100 %	Obra
	Resistência à tracção	ASTM D 638-	n/d	Amostra/Laboratório
	Módulo de elasticidade em tracção	02 ISO 527 (Pt 1+2)	n/d	Amostra/Laboratório
	Resistência à flexão	ASTM D790-02	n/d	Amostra/Laboratório
	Módulo de elasticidade em flexão	EN ISO 178	n/d	Amostra/Laboratório
	Resistência à compressão	à Prismas:	ASTM D 695-	Amostra/Laboratório
		Meios-Prismas	02 EN 12190	n/d
	Módulo de elasticidade em compressão	NP 196-1 E 397-1993	n/d	Amostra/Laboratório
	Temperatura de transição vítrea (Tg):			Amostra/Laboratório
	- DSC	ISO 11357 (Pt 1+2)	38,68 °C	
	- DMTA	ISO 6721 (Pt 1+5)	33,58 °C	
	Coeficiente de dilatação térmica	EN 1770	n/d	Amostra/Laboratório
	Absorção de água (em casos especiais)	EN 13580	n/d	Amostra/Laboratório
Controlo da aderência	Tipo de preparação da superfície	Ficha técnica	Decapagem com esmeril + primário	Obra
	Avaliação do estado de cura	Inspecção Visual	n/d	Obra
	Resistência à tracção por arrancamento (ensaio de <i>Pull-off</i> )	EN 1542 LNEC FE-Pa 36	4,580 MPa	Obra
Inspecção final	Análise visual	-	observar	Obra
	Ensaio acústico por pancadas ( <i>Tap test</i> )	-	medir	Obra

[1] – Quando sujeita a temperaturas compreendidas entre 5°C e 25°C.

s/i - Não especificado; n/d – não determinado;

Tabela 6.13 – Ficha de controlo do Compósito S&amp;P C-Sheet 240 + S&amp;P Resin Epoxy 55" – Especificações.

FASE DE EXECUÇÃO	PARÂMETRO/AVALIAÇÃO	NORMA	VALOR MÉDIO	OBSERVAÇÕES
Antes da aplicação	Tipo de fibra/cor	-	n/i	Ficha técnica
	Densidade da fibra (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 10119	1,7	Ficha técnica
	Peso na direcção principal - 0° (g/m <sup>2</sup> )	-	300	Projecto/Fic. técnica
	Largura (mm)	-	300	Projecto/Fic. técnica
	Quantidade de resina necessária para a impregnação	-	n/i	Ficha técnica
	Reacção ao fogo	Indicar a Euroclasse	n/i	Ficha técnica
Após a cura dos materiais	Temperatura e humidade relativa do ambiente e do superfície	Termómetro Higrómetro	T= 4, a 23 °C HR= 80-100 %	Obra
	Resistência à tracção - 0°	ASTM D 3039/	2123,64 MPa	Amostra/Laboratório
	Módulo de elasticidade em tracção 0°	D 3039M	161,9 GPa	Amostra/Laboratório
	Extensão na rotura em tracção - 0°	ISO 527 (Part 5)	1,00 %	Amostra/Laboratório
	Temperatura de transição vítrea (Tg): - DSC - DMTA	ISO 11357 (Pt 1+2) ISO 6721 (Pt 1+5)	Condicionante a Resina	Amostra/Laboratório
	Coeficiente de dilatação térmica	ISO 11359 (Part2)	n/d	Amostra/Laboratório
	Percentagem de vazios	ISO 14127	n/d	Amostra/Laboratório
	Absorção de água	EN 13580	n/d	Ver Resina
Controlo da aderência	Tipo de preparação da superfície	Ficha técnica	Decapagem com esmeril + primário	Obra
	Avaliação do estado de cura	Inspecção Visual	n/d	Obra
	Resistência à tracção por arrancamento (ensaio de <i>Pull-off</i> )	EN 1542 LNEC FE-Pa 36	2,600 MPa	Obra
Inspecção final	Análise visual	-	ver	Obra
	Ensaio acústico por pancadas ( <i>Tap test</i> )	-	medir	Obra

s/i - Não especificado; n/d – não determinado;

## 6.4 Considerações Finais

A presença em obra mostrou-se muito produtiva permitindo calibrar o trabalho que tinha sido desenvolvido até então. Foi importante perceber a forma como os procedimentos de construção se desenvolvem em obra, o que permitiu uma redacção do Capítulo 4 sensível a essa realidade. Esta primeira implementação do controlo de qualidade, objecto do Capítulo 5, permitiu tirar importantes conclusões quanto à sua aplicabilidade e da adequabilidade dos procedimentos e ensaios por este propostos.

Das diversas ilações que se foram recolhendo durante todo o acompanhamento da obra, expõem-se aquelas que foram consideradas como as mais relevantes:

- As listas de verificação constituem de facto uma mais-valia para a execução do controlo de qualidade, a sistematização da sucessão de pontos a controlar torna-o mais eficaz e maior facilidade de implementação;
- As pressões para o cumprimento de um calendário de obra apertado e o esmagamento de preços para a sua execução têm uma implicação negativa directa na dedicação às tarefas relacionadas exclusivamente com o controlo de qualidade;
- A aposta na formação é fundamental para que se consiga a consciencialização dos intervenientes para as repercussões que eventuais negligências podem originar;
- Os ensaios de *pull-off* e de *tap test* revelaram-se realmente práticos e fiáveis para a validação do reforço, no presente caso, ambos os ensaios se corroboraram quando a detecção de vazios por intermédio do *tap test* se traduziu na redução do valor da resistência à tracção por arrancamento e no modo de ruína observado;
- As zonas de amostragem não devem ser identificadas em obra pois, ainda que inconscientemente, denota-se um maior zelo na sua execução que no resto da empreitada, comprometendo-se assim a sua representatividade;
- A caracterização dos materiais aplicados realmente em obra confirmou-se ser exequível por meio dos ensaios realizados em laboratório aos provetes recolhidos, essa informação possibilita a construção das “Fichas de controlo dos materiais” cujo conteúdo servirá para comparação com as especificações técnicas dos materiais requeridas em caderno de encargos.



# CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões Gerais

Em termos gerais, pode-se afirmar que os objectivos inicialmente estabelecidos para o presente trabalho foram alcançados. O principal objectivo do estudo foi fornecer uma informação ampla relativa à construção de um reforço com sistemas compósitos de FRP, que pudesse ser utilizada pelo projectista para a redacção das especificações técnicas a incluir no caderno de encargos da obra, podendo também servir como um “manual” para a construção de um reforço utilizando estes sistemas. Para a prossecução desse objectivo, para além do estudo bibliográfico, foi realizado o acompanhamento em obra do processo de reforço.

Foi compilado pela primeira vez num documento a identificação e especificação dos principais sistemas comerciais disponíveis em Portugal, com utilidade para o actual mercado omissso e disperso. As suas fichas técnicas encontram-se reunidas no anexo do relatório “Reforço de Estruturas por Colagem Exterior de Sistemas Compósitos de FRP – Manual de Procedimentos e de Controlo de Qualidade para Construção”, não se considerando pertinente a sua integração neste documento.

Foi possível sistematizar as principais propriedades dos materiais constituintes de um sistema compósito de FRP, segundo as directivas das EN 1504, com vista à fácil utilização destas em fase de projecto, para a redacção das condições técnicas dos materiais a incluir no caderno de encargos e, em fase de obra, para o seu controlo.

Foram compilados todos os procedimentos para a construção de um reforço com colagem exterior de compósitos de FRP, quer na vertente dos sistemas pré-fabricado como na vertente dos sistemas curados “*in situ*”. Também esta informação é de extrema utilidade, em fase de projecto, para o projectista formar as especificações técnicas de execução para integrar no caderno de encargos e, em fase de obra, para os aplicadores utilizarem como um “manual”.

As resinas epoxídicas são produtos bicomponentes que necessitam de ser processados (misturados) em obra, consequentemente as propriedades finais do produto dependem da forma como essa mistura e todo o seu manuseamento é processado, não sendo, portanto, à partida um dado adquirido que as propriedades finais são as especificadas nas fichas do produto. Com efeito, no momento de aplicação, estes materiais mostram-se muito susceptíveis às condições higrotérmicas, tanto ambiente como do substrato, e revelam pequenos intervalos de tempo para aplicação após a sua mistura. As temperaturas elevadas são um problema para as resinas epoxídicas mesmo após a sua cura, que na sua ocorrência, devido à acção fogo ou mesmo à elevação da temperatura ambiente em serviço, podem levar o reforço à ruína. É nesse sentido que se salienta a obrigação da inclusão de sistemas de protecção como parte integrante do processo de reforço.

Os sistemas compósitos de FRP exibem um comportamento a longo prazo e uma resistência às agressões ambientais superiores às mostradas pelos materiais em que são aplicados, o que constitui uma evidente mais-valia, sendo mesmo um factor preponderante para a decisão do seu uso em ambientes de grande agressividade.

Para além do adequado manuseamento das resinas é necessário que todo o processo de reforço seja controlado. O compósito de FRP só consegue actuar como reforço de uma estrutura se o substrato de betão exibir as propriedades requeridas para a transmissão de esforços e se a sua superfície reunir as condições necessárias à boa aderência do compósito de FRP.

A presença em obra permitiu concluir que o controlo de qualidade deverá ser considerado uma obrigatoriedade, ou seja, deverá ser uma imposição presente em caderno de encargos. As pressões para o cumprimento de um calendário de obra apertado e o esmagamento de preços para a sua execução, propiciam a negligência das tarefas relacionadas exclusivamente com o controlo de qualidade. A sua forma em listas de verificação torna-o mais prático e eficaz.

Os ensaios de *pull-off* e o *tap test* revelaram-se ensaios indispensáveis em obra para o controlo discreto da aderência entre os vários materiais colados entre si na técnica de reforço por colagem exterior.

A criação de zonas de amostragem e a recolha de provetes dos produtos “fabricados” em obra mostram-se procedimentos fundamentais para a validação do reforço, embora se ressalve que para as zonas de amostragem serem realmente representativas do restante reforço a sua localização não deverá ser explícita.

## 7.2 Desenvolvimentos Futuros

A abrangência dos objectivos propostos foi concretizada através do estudo de todo o processo de construção em todas as suas vertentes, pelo que foi necessário desenvolver o estudo essencialmente em extensão. Nesse sentido, o desenvolvimento do trabalho apresentado nesta dissertação deverá consistir, sobretudo, no aprofundamento de alguns dos aspectos nele tratados.



Relativamente à caracterização dos produtos, era importante que se conduzisse um estudo que aprofundasse quais as propriedades a exigir a cada resina epoxídica, em função do seu objectivo específico na construção do reforço. No presente trabalho existem características de desempenho em que a informação relativa aos valores mínimos a cumprir é omissa, ou por depender especificamente de cada formulação de cada fabricante, ou por não ser possível ainda balizar qual o seu valor limite.

O processo de construção do reforço requer ensaios tanto para a inspecção do substrato como para validar o sistema compósito de FRP já aplicado. Uma investigação no sentido de avaliar a adequabilidade das actuais tecnologias de ensaio a este método de reforço é importante. Frisando-se a avaliação da resistência à tracção de um compósito de FRP “fabricado” em obra, em resultado da aplicação um sistema curado “*in situ*”. Com efeito, subsistiu a dúvida se essa avaliação deveria ser realizada como fibra seca ou pelas normas de um compósito de FRP.

Dentro do controlo de qualidade interessava discutir qual a frequência da execução de zonas de amostragem por extensão de reforço.

Neste trabalho foi abordado o controlo de qualidade na fase de execução do reforço e na fase pós-execução do reforço, ficando por desenvolver a terceira fase do controlo de qualidade durante o período de serviço da estrutura. Esta fase pretende monitorizar e inspeccionar o reforço, continuamente ou em momentos discretos, ao longo da sua vida útil.

Com o crescendo da técnica NSM (*near surface mounted*) em alternativa à colagem exterior, é desejável a breve trecho alargar as especificações de construção e o controlo de qualidade a esta técnica.



## Referências

### Gerais

ACI 224.1R, 1993, "ACI 224.R, 2001, "Control of Cracking in Concrete Structures", American Concrete Institute, Committee 224, USA, Janeiro.

ACI 224.R, 2001, "Control of Cracking in Concrete Structures", American Concrete Institute, Committee 224, USA, Maio.

ACI 440.1R-06, 2006, "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", Reported by ACI Committee 440 (to replace 440.1R-96), Emerging Technology Documents, American Concrete Institute, USA, 348 pp.. (versão de trabalho).

ACI 440.1R-96, 1996, "State-of-Art Report on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", Reported by ACI Committee 440, Emerging Technology Documents, American Concrete Institute, USA, 68 pp.

ACI 440.2R-02, 2002, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", American Concrete Institute, Committee 440, USA, Julho, 45 pp.

ACI 503R-93, 1993, "Use of epoxy compounds with concrete", American Concrete Institute, Committee 503, USA, julho, 28 pp.

ACI 546R-96 "Guide for Repair of Concrete Bridge Superstructures".

A-P-E System, 2001, "A-P-E® Process for Corrosion Intervention & Structural Repair - A-P-E® Translucent FRP Jackets and A-P-E® Pile Grout", Technical Report, Master Builders, Inc., USA, 7 pp.

BARNES, A. e MAYS, C., 1999, "Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates", ASCE Journal of Composites for Construction, Volume 3, Issue 2, Maio, pp. 63-72.

BARROS J., FERREIRA D., FORTES A. e DIAS S., (2006) "Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening", Journal of Construction and Building Materials, Elsevier, Vol. 20: 478-491.

BERTOLINI, E., ELSENER, B., PEDEFERRI, P. E POLDER, R., 2004, "Corrosion of Steel in Concrete – Prevention, Diagnosis, Repair.", 424pp.

- BRITO, J., 2005, "Patologias em Pontes de Betão", 1º Ciclo de Seminários de Engenharia Civil – ESTIG", Instituto Superior Técnico, DECivil, Lisboa.
- BROWN, J. e HAMILTON III, H., 2003, "NDE of Reinforced Concrete Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Composites using Infrared Thermography", Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Florida, USA, 8 pp.
- CAMPOS, D e PEDROSA, F, 2006, "Reforço de Estruturas de Betão com Sistemas de FRP – Plano de Procedimentos de Construção e Plano de Controlo de Qualidade", Relatório de Seminário de Materiais e Processos de Construção 2005-2006, orientação de Luís Juvandes, FEUP, Julho, 77pp.
- CERF, 2001, "Gap Analysis for Durability of Fibre Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure", Civil Engineering Research Foundation (CERF), report nº 40578, American Society of Civil Engineers (ASCE), USA, 127pp.
- CNR-DT 200, 2005, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Materials, RC and PC structures, masonry structures", CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Italian National Research Council, Roma, 154 pp.
- CORREIA, C. G., 2006, "Sistemas Compósitos de FRP - Higiene, Segurança e Ambiente", Relatório de Pós-Graduação de Estruturas de Engenharia Civil, Disciplina de Seminário do Curso de Pós-Graduação / Mestrado de Estruturas de Engenharia Civil, ano lectivo 2005-2006, FEUP, Julho, 75pp.
- EDGE STRUCTURAL COMPOSITES, 2006, "Fiber-Bond™ Installation", <http://www.edgefrp.com>, Edge Structural Composites, Sonoma, USA.
- EUROCOMP, 1996, "Structural design of polymer composites – EUROCOMP design code and handbook", the European Structural Polymeric Composites Groups, editado por John L. Clarke, E & FN Spon, ISBN 0419194509, Londres, 751 pp.
- FERREIRA, J. e BRANCO, F., "Inspeção de edifícios", Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Secção de Construção, Lisboa, 18 pp.
- fib Bulletin Nº14, 2001, "Externally bonded FRP reinforcement for RC", relatório técnico, federation internationale du béton, Lausanne, Suíça, Julho, 138 pp.

- FIVE STAR PRODUCTS, INC., 2006, "Basic application pictorial for Five Star Epoxy Adhesives, including repair overview, setting injection ports, injection and core sample of completed repair.", <http://www.fivestarprouducts.com>, Five Star Products, INC., Fairfield, USA.
- FONSECA, S.B.C., 2005, "Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Usados na Engenharia Civil – Características e Aplicações", ICT informação técnica Materiais de Construção, ITMC 35, LNEC, Lisboa, 154 pp.
- HOLLAWAY, L. e LEEMING, M., 2000, "Strengthening of reinforced concrete structures – Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering", Cambridge, England, 327 pp.
- ICRI No. 03733, 1997, "Guide for Selecting and Specifying Materials for Repair of Concrete Surfaces".
- ICRI, 1995, "Guide for surface preparation for the repair of deteriorated concrete resulting from reinforcing steel corrosion", International Concrete Repair Institute, Technical Guideline No. 03730.
- JUVANDES, L.F.P. e COSTA, A.G., 2003, "Reforço dos Elementos Escultóricos Decorativos do Edifício Palladium no Porto", Relatório Técnico e Memória de Cálculo, edição do Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), Outubro, Porto, 7 pp.
- JUVANDES, L.F.P. et al, 2005, "Construção com Novos Materiais", documento de compilação dos acetatos de apoio às disciplinas de "Seminário de Materiais e Processos de Construção" e "Construção com Novos Materiais", do 5º ano do curso de Licenciatura em Engenharia Civil e às disciplinas de "Materiais Estruturais" e "Reabilitação e Reforço de Estruturas", do curso de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, período 2001 a 2005, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), publicação FEUP, Porto, Janeiro, 600 pp.
- JUVANDES, L.F.P., 1999, "Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP", dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor, DECivil, Porto, Setembro, 400 pp.
- JUVANDES, L.F.P., 2002-a, "Novos Materiais: Parte 2 - Materiais Compósitos; Parte 3 – Outros Materiais", compilação de vários documentos de apoio às disciplinas de "Ciência dos Materiais", de "Seminário de Materiais e Processos de Construção" e de "Construção com Novos Materiais", do curso de Licenciatura em Engenharia Civil e de apoio às disciplinas de "Novos Materiais" e de "Reabilitação e Reforço de Estruturas", do curso de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP). Publicação em CD e publicação electrónica nos conteúdos da disciplina disponíveis na web-page do SiFeup e em: ([http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr\\_Estr/NovosMateriais/index.htm](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr_Estr/NovosMateriais/index.htm)).

- JUVANDES, L.F.P., 2002-b, "Reforço e Reabilitação de Estruturas - Módulo 2: Reforço de estruturas com sistemas de FRP", capítulo da publicação "Reforço e reabilitação de estruturas" de Costa, A.G. e Juvandes, L., Curso de Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros, Secção Regional da Madeira, 5 – 6 de Abril, Funchal, Madeira, Edição FEUP, Porto, Portugal, Abril, 200 pp.. Publicação electrónica do Módulo 2 na web-page do SiFeup e em: ([http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr\\_Estr/NovosMateriais/index.htm](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr_Estr/NovosMateriais/index.htm)).
- JUVANDES, L.F.P., 2007, "Materiais Compósitos Reforçados com Fibras na Construção Civil", capítulo da publicação "Ciclo de Projecto Casa do Futuro", editado por AveiroDomus – Workshop - InovaDomus Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro, Aveiro, Maio, Depósito Legal 258992/07, pp. 190 – 215 e 283 – 295.
- JUVANDES, L.F.P., SILVA, P.C., ALPALHÃO, M.M., MOREIRA, J.J e SILVA, M.J., 2006, "A temperatura e a técnica de reforço por colagem de sistemas de FRP", no CD das 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 2006, LNEC, Lisboa, 13 – 16 Dezembro, Resumo alargado, pp 184-185.
- KAISER, H. e KARBHARI, V., 2001, "Quality and monitoring of structural rehabilitation measures - Part 1: Description of Potential Defects", Report submitted to the Oregon department of transportation, Novembro, 48 pp.
- KAISER, H. e KARBHARI, V., 2002, "Quality and monitoring of structural rehabilitation measures - Part 2: Review and Assessment of Non-destructive Testing (NDT) Techniques", Report submitted to the Oregon department of transportation, Março, 134 pp.
- KARBHARI, V., CHIN, J., HUNSTON, D., BENMOKRANE, B., JUSKA, T., MORGAN, R., LESKO, J., SORATHIA, U. E REYNAUD, D., 2003, "Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure", Journal of composites for construction, ASCE, Agosto, pp. 238-247.
- KARBHARI, V., MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M., NANNI, A., 2004, "Constructions Specifications for Bonded Repair and Retrofit of Concrte Structures Using FRP Composites – Results of a NCHRP Study", COMPOSITES 2004 Convention and Trade Show American Manufacturers Association, Tampa, Florida, USA, 10 pp.
- LEITE, A.L.C e LOUREIRO, L.M.M., 2007, "Gestão de Resíduos de Projectos com Aplicação de Sistemas Compósitos de FRP", Relatório de Seminário de Materiais e Processos de Construção 2005-2006, orientação de Luís Juvandes FEUP, Julho, 191pp.

- LOOV, E., e RODWAY, E., 1990, "Determination of Elevation, Slope and Waiviness of Surface Using the Procedures of CAN/CSA-A23.1-M90Appendix E", Calgary, Canada, 675 pp.
- MACK, K. e HOLT, E., 1999, "The effect of vapour barrier encapsulation of concrete by FRP strengthening systems", Proceedings of 44<sup>th</sup> International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, California, USA, Maio, 12 pp.
- MAERZ, N., 2003, "Nondestructive Ultrasonic Detection of FRP Delamination", Center for Infrastructure Engineering Studies, University Transportation Center Program, University of Missouri-Rolla, Rolla. USA, Junho, 20 pp.
- MAERZ, N., CHEPUR, P., MYERS, J. e LINZ, J., 2001, "Concrete Roughness Characterization Using Laser Profilometry for Fiber-Reinforced Polymer Sheet Application", Transportation Research Board, 80<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington, D.C., USA, Janeiro, 13 pp.
- MAYS, C. e HUTCHINSON, R., 1992, "Adhesives in Civil Engineering", Cambridge, junho, 345 pp.
- MBRACE, 2004, Catálogo Comercial, Nova Iorque, Estados Unidos da América.
- MEIER, U., 1997, "Repair using advanced composites", proceedings of the International Conference of Composite Construction - Conventional and Innovative, IABSE, Innsbruck, Austria, Setembro, pp. 113-124.
- MEIRA, G., PADARATZ, I., JÚNIOR, J., 2006, "Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento", XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Brasil, Agosto, pp. 3029-3037.
- MINISTÉRIO do EQUIPAMENTO, do PLANEAMENTO e da ADMINISTRAÇÃO do TERRITÓRIO, 1999, "Decreto-Lei n.º 59/99", Série I-A, Diário da República N.º 51/99, Março, pp. 1102-1156.
- MM6, 2005, "Classification and Assessment of Composite Materials Systems for use in the Civil Infrastructure - CompClass", Department of Trade and Industry (DTI), UK DTI-funded project MM6, website: [www.compclass.org](http://www.compclass.org).
- MYERS, J. e EKENEL, M., "Effect of Environmental Conditions on Bond Strength between CFRP Laminate and Concrete Substrate", 22 pp.
- NANNI, A. e LOPEZ, A., 2004, "Validation of FRP Composite Technology through field testing", University of Missouri-Rolla, Rolla. USA, 8 pp.

- NCHRP Report 514, 2004, "Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites – Recommended Constructions and Process Control Manual", National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., USA, 99 pp.
- NCHRP Report 564, 2006, "Field Inspection of In-Service FRP Bridge Decks", National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., USA, 175 pp.
- PULTRALL, 2006, "Manufacturing Process", <http://www.pultrall.com>, Pultral Inc., Quebec, Canada.
- RIBEIRO, S., GONÇALVES, A. e CATARINO, J., (2000) "Reparação de estruturas de betão na normalização europeia", Actas da conferência nacional REPAR 2000, LNEC, Junho, Lisboa, pp. 105-113.
- RODRIGUES, C., 2005, "Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado com Sistemas Compósitos de FRP", Universidade Nova de Lisboa, Centro de Investigação em Estruturas e Construção, Lisboa, Maio, 77 pp.
- ROGERTEC, 2006, "DYNA pull-off tester", <http://www.rogertec.com.br>, Rogertec Engenharia e Comércio Ltda., Brasil.
- RUTZ, J., 1995, "Mit klebebewehrungen verstärkte stahlbetondecken im brandfall - schadenbegrenzung als teill des vorbeugenden brandschutzes", Lajes em betão armado reforçadas com armaduras coladas em situação de fogo - Controlo de prejuízos com protecção ao fogo, GVA, AFS, St. Gallen, 15 pp.
- S & P, 1998, "30 x less weight than steel for the same tensile force", literatura técnica de apoio do sistema S & P – Clever Reinforcement Company, Scherer & Partner bausystem, 30 pp.
- SIKA, 2003, "Sika Services AG, Corporate Construction", Zurique, Suíça.
- SILVA, P. A. S. C. M., 2007, "Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP", dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Eng<sup>o</sup> Civil, DECivil, Porto, 350 pp. (em publicação).
- Sistema BETONTEX, 2006, "Fichas técnica", BLEU LINE Conservação e Restauro de Obras de Arte, Lda.
- Sistema MAPEI, 2006, "Fichas técnica e fichas de dados de segurança", Mapei- Luso Mapei, SA.
- Sistema MBACE BASF, 2007, "Fichas técnica e fichas de dados de segurança", BASF Construction Chemicals Portugal.



- Sistema MBACE Bettor-MBT, 2006, "Fichas técnica", Bettor MBT Portugal, SA.
- Sistema REPLARK, 2007, "Fichas técnica", EcoSpring – Estudos e Representações Técnicas, Lda.
- Sistema RUREDIL, 2006, "Fichas técnica", Tradibau, Arquitectura e Engenharia, Lda.
- Sistema S&P REINFORCEMENT, 2006, "Fichas técnica e fichas de dados de segurança", Clever Reinforcement Ibéria Lda.Sistema S&P.
- Sistema SIKA, 2006, "Fichas técnica e fichas de dados de segurança", Sika Portugal – Produtos Construção e Industria, SA.
- SORATHIA, U., DAPP, T. and BECK, C., 1992, "Fire Performance of Composites," Materials 25 Engineering, V. 109, No. 9, pp. 10-12.
- TÄLJSTEN, B. e CAROLIN, A., 1998, "Strengthening of a concrete railway bridge in Lulea with carbon fibre reinforced polymers - CFRP - Load bearing capacity before and after strengthening", Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Stockholm e Luleå, Dezembro, 62 pp.
- TORRES-ACOSTA, A., 2002-a, "Galvanic Corrosion of Steel in Contact with Carbon-Polymer Composites. I: Experiments in Mortar", Journal of Composites for Construction, Maio, pp. 112-115.
- TORRES-ACOSTA, A., 2002-b, "Galvanic Corrosion of Steel in Contact with Carbon-Polymer Composites. II: Experiments in Concrete", Journal of Composites for Construction, Maio, pp. 116-122.
- TRADECC, 2005, "PC® Carbocomp", Catálogo comercial, Wilrijk-Antuérpia, Bélgica.
- WENDEL, F., 1995, "Vortrag klebebewehrungen GVB/AIB", sistema PROMAT AG, Palestra sobre Armaduras Coladas GVB/AIB, Informação técnica, Winterthur-Hegi, 7 pp.
- YANG, C., NANNI, A. e DHARANI, L., 2001, "Effect of Fiber Misalignment on FRP Laminates and Strengthened Concrete beams", 9th Int. Conf., Structural Faults and Repair, London, UK, Julho, 13 pp.
- YE, L., FRIEDRICH, K., WEIMER, C. e MAI, Y., 1998, "Surface treatments and adhesion bonding between concrete and a CFRP composite", Adv. Composite Mater, Vol 7, No. 1, pp. 47-61.

## Normas

ASTM D 638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

ASTM D2990-01, 2001 "Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics", ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), USA.

ASTM D3479/D3479M-96, 2007, "Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), USA.

EN 821-1 Monolithic ceramics - Thermophysical properties - Determination of thermal expansion.

EN 1504-1, 2004, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 2: Surface protection systems for concrete."

EN 1504-2, 2004, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 2: Surface protection systems for concrete."

EN 1504-3, 2005, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair."

EN 1504-4, 2004, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 4: Structural bonding."

EN 1504-8, 2004, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 8: Quality control and evaluation of conformity."

EN 1504-9, 1997, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 9: General principles for the use of products and systems."

EN 1542 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of bond strength by pull-off.

EN 1770 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of the coefficient of thermal expansion.

- EN 1799 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Tests to measure the suitability of structural bonding agents for application to concrete surfaces.
- EN 2378 Aerospace series - Fibre reinforced plastics - Determination of water absorption by immersion.
- EN 3615 Aerospace series - Fibre reinforced plastics - Determination of the conditions of exposure to humid atmosphere and of moisture absorption.
- EN 12188 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of adhesion steel-to-steel for characterisation of structural bonding agents.
- EN 12189 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of open time.
- EN 12190 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of compressive strength of repair mortar.
- EN 12614 Product and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of glass transition temperatures of polymers.
- EN 12617-3 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Part 3: Determination of early age linear shrinkage for structural bonding agents.
- EN 13057 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption.
- EN 13412 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of modulus of elasticity in compression.
- EN 13529 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Resistance to severe chemical attack..
- EN 13580 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Water absorption and resistance to alkali for hydrophobic impregnations.
- EN 13733 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of the durability of structural bonding.
- EN 12189 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of open time.

- EN 13894-2 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods; Determination of fatigue under dynamic loading - Part 2: After hardening.
- EN 14022 Structural adhesives – Determination of the pot life (working life) of multicomponent adhesives.
- EN ISO 62 Plastics - Determination of water absorption.
- EN ISO 178 Plastics. Determination of tensile properties. ISO 3219 Plastics – Polymers/resins in the liquid state or as emulsions or dispersions – Determination of viscosity using a rotational viscometer with defined shear rate.
- EN ISO 527-5 Plastics - Determination of tensile properties - Test conditions for unidirectional fibre reinforced plastic composites.
- ISO 899-1, 2003, “Plastics - Determination of creep behaviour - Part 1: Tensile creep”, International Standard, International Organization for Standardization (ISO), 15pp.
- ISO 3219 Plastics - Polymers/resins in the liquid state or as emulsions or dispersions - Determination of viscosity using a rotational viscometer with defined shear rate.
- ISO 4892-3 Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps.
- ISO 10119 Carbon fibre - Determination of density.
- ISO 11357-2 Plastics - Differential Scanning Calorimetry (DSC) - Determination of glass transition temperature.
- ISO 13003, 2003, “Fibre-reinforced plastics - Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions”, International Standard, International Organization for Standardization (ISO), 17 pp.
- ISO 14127 Composites – Determination of the resin, fibre and void content for composites reinforced with carbon fibre.